



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023

Российский Форум
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023

9-я Научная конференция
«ЭКБ и микросистемные модули»
Сборник тезисов

Парк науки и искусства «Сириус»
9–14 октября 2023 г.



ТЕХНОСФЕРА

Организаторы:
АО «НИИМЭ»
АО «НИИМА «Прогресс»

При поддержке:
Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Группа компаний «Элемент»

Генеральный информационный партнер:
АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023

**РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023»**
9-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов

Парк науки и искусства «Сириус»
9–14 октября 2023 г.

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2023

УДК 621.3.01/.09

ББК 38.843

Р76

Р76 Российский форум «Микроэлектроника 2023»

9-я Научная конференция

«ЭКБ и микроэлектронные модули».

Сборник тезисов

Парк науки и искусства «Сириус», 9–14 октября 2023 г.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 970 с.

В выпуск включены тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей.

УДК 621.3.01/.09

ББК 38.843

© АО «НИИМЭ», 2023

© АО «НИИМА «Прогресс», 2023

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2023

Качество рисунков соответствует предоставленным авторами материалам.

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	38
Основные тренды в микроэлектронике для поддержки искусственного интеллекта	
<i>Белусов С. А.</i>	38
Многоуровневые мемристовые структуры для когнитивных вычислений	
<i>Андреева Н. В., Мазинг Д. С., Петров М. О., Рындин Е. А.</i>	39
Нейроморфные вычислительные системы на основе КМОП-интегрированных мемристорных матриц: современное состояние и перспективы развития	
<i>Щаников С. А.</i>	41
ТРЕК ОБЗОРНО-ДИСКУССИОННЫХ ЗАСЕДАНИЙ.....	43
Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения	
<i>Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А.</i>	43
НАВИГАЦИОННО-СВЯЗНЫЕ СБИС И МОДУЛИ.....	45
Развертывание локальной системы навигации в условиях подавления сигналов ГНСС. Моделирование работы системы в различных конфигурациях	
<i>Корнеев И. Л., Прасолов В. Ф.</i>	45
Использование архитектуры RISC-V для проектирования микросхем в целях использования в системах передачи информации	
<i>Игошин А. В., Лебедев А. В., Степанова А. С.</i>	48
Линейка телематических модулей: достижения и перспективы развития	
<i>Чикваркин И. Б., Потапов И. В., Скворцов В. О., Прасолов А. А.</i>	50
Технологический суверенитет в сфере навигационного обеспечения	
<i>Скиба Е. С.</i>	52
Особенности проектирования КМОП нано-СБИС объемного кремния с повышенной дозовой стойкостью	
<i>Герасимов Ю. М.</i>	53
Интегральный СШП-СКИ-трансивер	
<i>Маниленко И. Н., Каличкин С. В.</i>	55
Методика проектирования многочастотных вибраторных антенн с реактивными включениями	
<i>Бойко С. Н.</i>	57
Термостатированные кварцевые генераторы с высокой механической прочностью	
<i>Ложников А. О.</i>	60

Высокоточная спутниковая навигационная аппаратура для частотно-временных задач и позиционирования	
<i>Вейцель А. В.</i>	62
Анализ и оптимизация усилителя промежуточной частоты с повышенной чувствительностью и напряжением питания 1 В	
<i>Суэтинов В. И., Полевиков В. В., Шомахмадов Д. П.</i>	64
Создание STW-резонаторов с повышенной добротностью до 11000, улучшенной температурной стабильностью в расширенном частотном диапазоне до 1000 МГц в миниатюрных SMD-корпусах 3×3×1,8 мм	
<i>Доберштейн С. А., Веремеев И. В., Разгоняев В. К.</i>	66
Актуальные вопросы создания отечественной аппаратуры позиционирования внутри помещений	
<i>Полторацкий В. Е., Заславский Е. Л.</i>	68
Технология интеллектуальной навигации на основе комплексирования ЛСН проекта «КОНСУЛ» и данных лазерной локации	
<i>Старовойтов Е. И.</i>	69
Совместное использование потоков поправок PPP-B2b и HAS	
<i>Мамаев А. А.</i>	72
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	74
Особенности разработки высокопроизводительной подсистемы обработки команд современных контроллеров твердотельных накопителей информации	
<i>Любавин К. Д.</i>	74
Разработка высокопроизводительного контроллера NAND-памяти с программируемой системой команд интерфейса ONFI/Toggle	
<i>Любавин К. Д.</i>	77
Процессорные ядра RISC-V с поддержкой Linux	
<i>Козлов А. В.</i>	80
Система двухфазного охлаждения микроэлектроники	
<i>Французов М. С., Комратов Д. В., Кукишинов Н. В., Хлопов А. Д., Авдеев Г. А.</i>	81
Отечественные управляющие вычислительные комплексы и программное обеспечение для АСУ ТП	
<i>Глухов А. В.</i>	84
Организация системы тестирования программного обеспечения для платформы «Эльбрус»	
<i>Молчанов И. А., Михайлова И. А.</i>	86
Программируемый отечественный маршрутизатор на ПЛИС с производительностью терабитного уровня	
<i>Елизаров С. Г., Гончаров С. В., Попов А. А., Лукьянченко Г. А., Монахов А. М., Лукин К. И.</i>	88



НИИМЭ

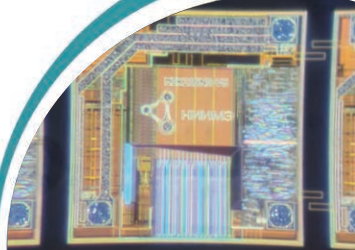
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ) был основан 9 марта 1964 года Приказом Госкомитета СССР по электронной технике и стал головным предприятием отрасли по разработке и производству интегральных микросхем. Сегодня НИИМЭ – ведущий российский научно-исследовательский центр по проведению научно-технологических исследований в области микро- и нанозлектроники, разработке и производству полупроводниковых изделий.

- **Фундаментальные исследования в области физики полупроводников**
- **Разработка технологических процессов и IP-блоков**
- **Разработка микросхем, микроэлектронных модулей и программного обеспечения**

В 2016 году постановлением Правительства РФ НИИМЭ было определено головным предприятием приоритетного технологического направления «Электронные технологии». В этом статусе институт осуществляет координацию деятельности научных и производственных организаций микроэлектронной отрасли России по разработке и применению отечественной элементной базы в электронных изделиях российского производства.

Под научным руководством президента РАН, руководителя приоритетного технологического направления «Электронные технологии РФ», академика РАН Г.Я. Красникова научно-исследовательскими работами в НИИМЭ занимаются более 500 специалистов, в том числе 4 академика РАН, член-корреспондент РАН, более 70 кандидатов и докторов наук.



124460, Россия, Москва, Зеленоград,
улица Академика Валиева, 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 229-70-00
niime@niime.ru
www.niime.ru

ВЕДУЩИЙ ДИЗАЙН-ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

по разработке специализированной микроспециальной элементной базы



НАВИГАЦИЯ



МИКРОСХЕМЫ
СВЧ



РАДИОСТОЙКОСТЬ



ЦИФРОВЫЕ
МИКРОСХЕМЫ



УПРАВЛЕНИЕ



КОСМОС
И АВИА



АНАЛОГОВЫЕ
МИКРОСХЕМЫ



СВЯЗЬ



PR32-B3
Wi-Fi + Bluetooth
модуль



ПРО-04М
Навигационный модуль
для приема ГНСС-сигналов



PR4502
Bluetooth-модуль

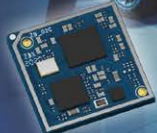


PN 6280
Коммуникационный
модуль GSM (2G/3G)

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА



PR1803
Модуль LTE (Cat.4)



PR502
2G (GSM/GPRS)
модуль



PR1603
Модуль LTE (Cat.1)



K1917BA014
RISC-микроспециальная база
с развитой периферией для применения
в навигационной аппаратуре



K1917BC024
Универсальный микроспециальная база
Cortex-M3 для организации
приемопередающего тракта



i-progress.tech

+7 (499) 153 0271
 +7 (499) 281 7057



ПРОГРЕСС
НИИ микроспециальной аппаратуры

info@i-progress.tech



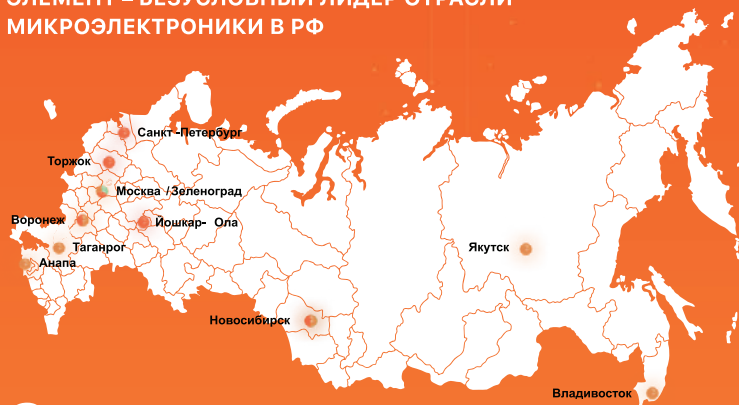
Элемент

ГК «Элемент» объединяет ведущие российские предприятия в сфере микроэлектроники. Это национальный лидер в сфере высоких технологий, крупнейший разработчик и производитель микроэлектроники.

Продукция ГК «Элемент» предназначена для технологической индустрии и прикладных решений цифровой экономики: инфраструктуры умного города, систем идентификации, сете связи, телемедицины и энергетики, автоматизации промышленности и критической инфраструктуры. Компания создает новый технологический контур и бренд независимой микроэлектроники, свободной от иностранных барьеров и технологий, чтобы обеспечить возможность опережающего цифрового развития для России.

Приоритетом для нас является развитие суверенитета экономики РФ в условиях санкционного времени и совершенствование радиоэлектронной промышленности, так как оно незаменимо и неотъемлемо участвует в жизни ведущих отраслей экономики страны.

**ЭЛЕМЕНТ – БЕЗУСЛОВНЫЙ ЛИДЕР ОТРАСЛИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В РФ**



6 Фабрик

10 Центров
разработки



Производство Разработка Аппаратура

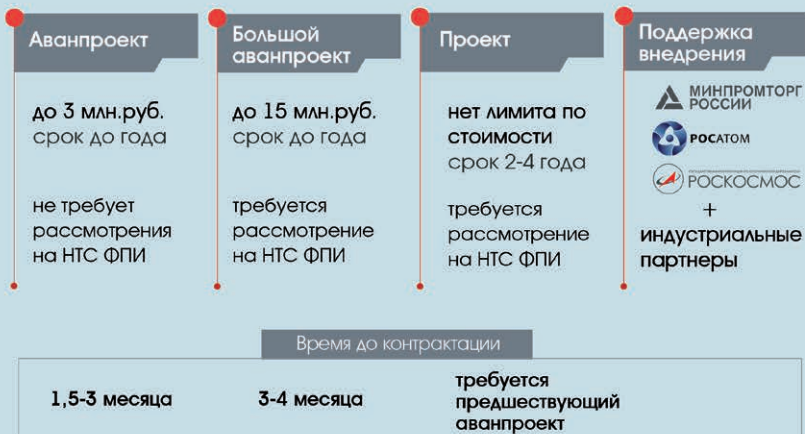


Основные направления поиска идей и реализации проектов в области создания перспективной электроники:

- технологии ускорения и удешевления проектирования СБИС;
- технологии корпусирования;
- энергоэффективные архитектуры;
- энергонезависимая память;
- ЭКБ цифровых антенных решеток;
- оптоэлектроника ИК-диапазона;
- силовая электроника предельных параметров.

А также поисковые мероприятия по применению квантовых технологий, нейроморфных технологий, технологий двумерных материалов и технологий фотоники.

ОТ ИДЕИ ДО ПРОЕКТА



▶ Срок контрактации проекта от 2 рабочих дней (при отличном выполнении аванпроекта) до 3 месяцев после НТС

Современные технологии для аппаратного ускорения работы алгоритмов



Искусственный
интеллект



Распознавание
по голосу



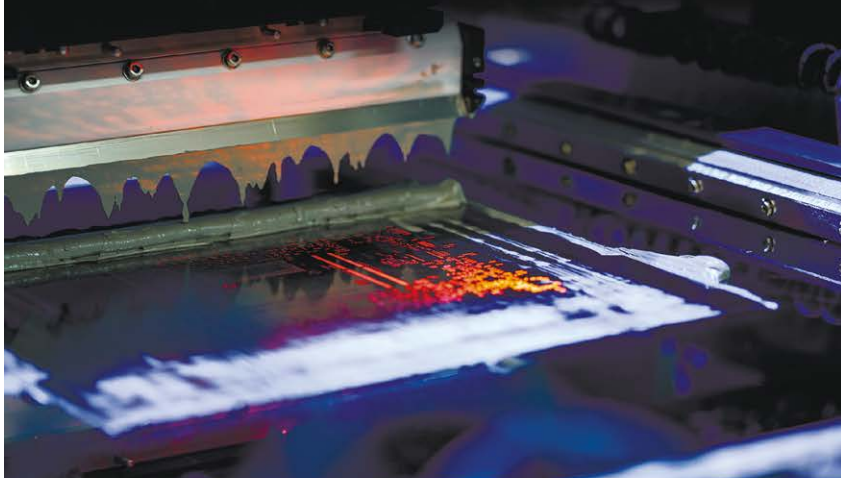
Компьютерное
зрение



Прикладные
задачи ИИ



СДЕЛАНО В РОССИИ



**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ДОВЕРЕННЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЫ
ДЛЯ ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА**



kraftway®
РОССИЙСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

WWW.KRAFTWAY.RU



Технологии Сбера



8 800 333 03 03

psbank.ru

ПАО «ПРОМСВЯЗЬБАНК»

ГЕНЕРАЛЬНАЯ ЛИЦЕНЗИЯ БАНКА РОССИИ № 3251. ОГРН 1027739019142,
Г. МОСКВА, УЛ. СМИРНОВСКАЯ, Д. 10, СТР. 22

mikron



Элемент

mikron



Элемент

mikron

КОМАНДНЫЙ ЗАЧЕТ = ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ!

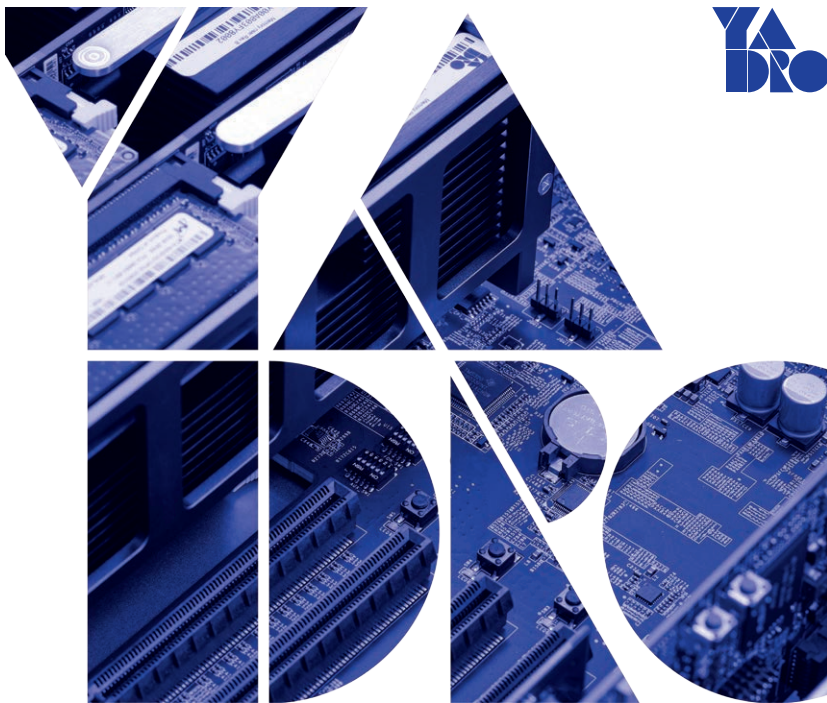
СОЗДАЮ
МИРЫ

ЦИФРЫ
С РУССКИМ
ХАРАКТЕРОМ

скоро откроется

второе дыхание

ЗА НАУКУ,
ПРОИЗВОДСТВО
И ЗДОРОВЫЙ ДУХ!



YADRO — российская технологическая компания, объединяющая направления разработки и производства вычислительных платформ, систем обработки и хранения данных, телекоммуникационного и сетевого оборудования, персональных и «умных» устройств, микропроцессорных ядер и fabless-разработку микропроцессоров. R&D центры расположены в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Нижнем Новгороде и Минске.

Сегодня продуктовый портфель YADRO включает серверную линейку стандартной архитектуры VEGMAN, семейство систем хранения данных TATLIN, линейку коммутаторов для центров обработки данных KORNFELD и бренд клиентских устройств KVADRA.



АЛМАЗНЫЙ КЛАСТЕР

БУДУЩЕЕ, СОЗДАННОЕ НАМИ

Алмазный Кластер был организован основными участниками отрасли

по созданию, обработке и применению натуральных и синтетических алмазов в промышленности, медицине, оптике, военно-промышленном комплексе в апреле 2023 года как отраслевая ассоциация для содействия устойчивому развитию индустрии в РФ и формированию инновационного лидерства в области алмазной электроники в мире.

В состав Алмазного Кластера входят производственные компании, центры исследований и разработок, научно-исследовательские институты, организации профессионального образования. Стратегическими партнерами Алмазного Кластера являются некоммерческие организации, содействующие развитию инноваций и профессиональной подготовке специалистов, научные издательства, информационные агентства, финансовые и экспертные организации.

Ключевой целью работы Алмазного Кластера является формирование инструментов для развития конкурентоспособной на мировом уровне Российской национальной промышленности синтетических алмазов и высокотехнологичных применений алмазных материалов.

Основные цели и задачи Алмазного Кластера:

- ◆ Повышение конкурентоспособности Российской отрасли производства синтетических алмазов и конечных продуктов из них;
- ◆ Представление интересов участников алмазной индустрии в государственных и иных структурах;
- ◆ Разработка стратегии повышения уровня жизни сотрудников отраслей предприятий;
- ◆ Подготовка кадров и формирование институциональной среды развития отрасли и участников Кластера посредством создания системы эффективного кластерного менеджмента;
- ◆ Поддержка интересов представителей алмазной отрасли и прочих участников профильных рынков в России и продвижение за рубежом;
- ◆ Создание финансовых инструментов для развития отрасли, внедрение механизмов привлечения финансирования, управления финансовыми инструментами;
- ◆ Цифровизация алмазной индустрии.



Последовательный 28 Гб/с NRZ-передатчик с энергоэффективностью 3,2 мВт/Гб/с с квадратурным тактированием по технологии КМОП 28 нм <i>Ларионов А. В., Буякова О. Н., Сысоева О. В., Тарасов И. В.</i>	90
Методы снижения энергопотребления СФ-блоков высокоскоростных АЦП <i>Руткевич А. В.</i>	92
Перспективы использования квантовых сопроцессоров в высокопроизводительных вычислительных комплексах <i>Кириллюк М. А.</i>	94
Разработка модуля мониторинга производительности для вычислительной системы <i>Хайдуков Д. И.</i>	96
Автоматический синтез конвейеризованных аппаратных ускорителей на основе компилятора предметно-ориентированного языка с учетом топологического представления <i>Тарасов И. Е., Советов П. Н.</i>	98
Создание эффективных вычислительных комплексов для топологического проектирования <i>Федоткин А. С., Лобанова А. Г.</i>	100
Анализ эффективности схем компрессии данных для подсистемы памяти процессора <i>Недбайло Ю. А., Сурченко А. В.</i>	102
Применение имитационного моделирования микропроцессора для оптимизации архитектуры подсистем памяти <i>Гревцев Н. А., Зубковский П. С., Чибисов П. А.</i>	104
Оптимизация контроллера оперативной памяти DDR4 процессоров серии «Эльбрус» <i>Петров И. А., Недбайло Ю. А.</i>	106
<i>ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»</i>	106
Аппаратное ускорение постквантовых криптографических алгоритмов <i>Турченко О. Ю.</i>	108
Режимы быстрого рестарта вычислительных комплексов для обеспечения сбоеустойчивости <i>Ломако С. Г., Михайлова И. А.</i>	110
Расширение подхода моделирования производительности Asim средствами модульного тестирования <i>Королев К. А., Крюков П. И., Ладин О. И.</i>	112

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	113
Разработка мобильного радиолокатора по обнаружению беспилотных воздушных судов	
<i>Цыпенков Ю. С., Анурин А. А., Овчинников В. Г.</i>	113
Особенности построения, разработки и использования ММО первичных радиолокационных станций	
<i>Акула В. А., Аракелян А. А., Светлов А. Ю., Сеницын Е. А.</i>	116
Алгоритмы синтеза изображений в многопозиционных ММО-РСА	
<i>Погорельский И. В., Цветков В. К., Кузьмин И. А.</i>	119
Сравнительный анализ антенных систем для абонентских терминалов новых спутниковых группировок связи	
<i>Космынин А. Н., Серегин Г. М., Филонов Д. С., Никулин А. В., Худыкин А. А., Петров А. Н., Сибирицев П., Шутов А. А.</i>	121
Библиотека функций сигнальной обработки для процессора «Скиф»	
<i>Беляев А. А., Иванников А. Е., Колесников Д. С., Кузнецов Д. А., Кучинский А. С., Ухова А. Р., Фролов А. А.</i>	124
Развитие антенно-интегрированных радиосистем нового поколения и их приложения	
<i>Ганицев А. Ю.</i>	126
Система беспроводного питания датчиков, стационарно установленных в нефтегазовых скважинах	
<i>Золотарев А. В., Корешин Е. А., Цыринова А. С., Чаттерджи С., Капитанова П. В., Баранов Г. Д.</i>	128
Проектирование устойчивых к смещениям систем индуктивного питания имплантатов	
<i>Данилов А. А.</i>	130
Разработка алгоритмического обеспечения для проектирования систем индуктивного питания имплантатов	
<i>Аубакиров Р. Р., Данилов А. А.</i>	131
Разработка системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому роторному насосу крови	
<i>Миндубаев Э. А., Морозов А. В.</i>	132
Разработка модуля отрицательной обратной связи для стабилизации выходной мощности в системе беспроводной передачи энергии	
<i>Гуров К. О.</i>	133
Оптимизация передающих катушек систем беспроводной передачи энергии «один ко многим»	
<i>Смирнов П. А., Мирошников А. И., Зотов Н. М., Вестфаль М., Капитанова П. В.</i>	134

Система беспроводной зарядки электротранспорта <i>Золотарев А. В., Баранов Г. Д., Цыринова А. С., Чаттерджи С., Терентьева П. В., Капитанова П. В.</i>	136
Построение электронных систем контроля концентрации глюкозы в крови <i>Пожар К. В., Литинская Е. Л., Михайлов М. О.</i>	138
Реализация управления усилителем мощности для повышения устойчивости к смещениям систем индуктивного питания имплантатов <i>Селютина Е. В.</i>	140
Оптимизация геометрии плоских катушек индуктивности с помощью эвристического алгоритма для систем индуктивного питания медицинской электроники <i>Морозов А. В., Данилов А. А.</i>	141
Перспективы развития отечественной приемно-передающей техники ДКМВ-диапазона: запрос со стороны ученых и разработчиков конечных устройств <i>Шиндин А. В.</i>	142
Применение алгоритмов параллельной обработки сигналов для реализации высокоскоростного программно-конфигурируемого OFDM-модема <i>Цуканова Е. Е., Лукьянчиков А. И., Сычев А. А., Клоков В. А., Каргин Н. И.</i>	143
Отечественная сим-карта для Интернета вещей с функцией защиты IP-трафика <i>Кузнецов А. С.</i>	146
Система защищенного промышленного Интернета вещей «КАБИНЕТ» <i>Исаев А. В.</i>	148
Аудиоприемник радиосистемы с поддержкой сетевого протокола AES67 <i>Стальнова Л. В., Бельков П. С.</i>	149
Аппаратно-программная система для проведения измерений оптически детектируемого магнитного резонанса в импульсном и непрерывном режимах <i>Сарайкин А. И., Клоков В. А., Саури А. Д., Жариков А. М.</i>	151
Исследование амплитудно-фазового распределения поля с применением радиофотонных технологий <i>Рыжук Р. В., Валуев В. В., Каргин Н. И., Кулагин В. В., Прохоров Д. А., Горелов А. А.</i>	153
Характериограф нелинейных элементов и устройств, работающих в видеоимпульсном режиме <i>Семенов Э. В., Назаров М. А.</i>	156
Универсальная диагностическая платформа НИРФИ на базе современных микроэлектронных компонентов <i>Грехнева К. К., Моисеев С. П., Шиндин А. В., Павлова В. А.</i>	158
Испытания макетов приемно-передающих систем НИРФИ на экспериментальных радиофизических полигонах ННГУ <i>Павлова В. А., Шиндин А. В., Моисеев С. П., Грехнева К. К.</i>	159

Создание ключевых унифицированных элементов целевой аппаратуры радиолокационного мониторинга Земли на основе РСА для применения на КА малой, средней и большой размерности <i>Лось В. О., Костров В. В., Ракитин А. В., Шайхулин А. Р., Куликов П. В.</i>	160
Опыт создания и снижения стоимости и массогабаритных характеристик РСА для БПЛА <i>Цветков В. К., Лялин К. С., Кузьмин И. А., Мелёшин Ю. М.</i>	162
Система фазовой автоподстройки частоты тактового сигнала в сети GigaSpaceWire LVDS <i>Добродеев А. В., Еремеев П. М., Логунов А. В., Лось В. О.</i>	163
Алгоритм спектральной обработки сигнала для доплеровского измерителя скорости и угла сноса летательного аппарата <i>Лавриненко А. Д., Переверзев А. Л.</i>	167
Аппаратный блок для формирования частотно-модулируемых сигналов с микропрограммным управлением <i>Силантьев А. М., Переверзев А. Л., Примаков Е. В.</i>	169
Алгоритм вычисления траекторной скорости по доплеровскому сдвигу частоты при неравномерном движении объекта <i>Медеев Д. А.</i>	171
Вторичный преобразователь импульсного сигнала фотоприемного устройства <i>Казённов К. В., Якунин А. Н.</i>	173
Актуальные проблемы при проектировании устройств сопряжения для информационно-управляющих систем <i>Косенко В. А., Савченко Ю. В.</i>	175
Образовательная платформа для изучения приемной части программно-конфигурируемых радиосистем на ЭКБ отечественного производства <i>Томсов В. В., Будяков А. С., Савченко Е. М.</i>	177
Пример использования платформы программно-аппаратного ускорения верификации систем на кристалле <i>Солодовников А. П., Силантьев А. М., Переверзев А. Л.</i>	179
Особенности адаптивной обработки данных в информационно-управляющих системах <i>Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Си Ту Тант Син</i>	181
Наземная отработка аппаратуры БРЛК на базе волоконно-оптической линии задержки <i>Былинкин И. К., Лось В. О.</i>	183
Моделирование выполнения сложных проектов на примере радиолокационного комплекса космического базирования <i>Кузнецова Е. С., Орлов И. А., Федюнина Е. А., Чукин П. Е., Иванченко С. А.</i>	185

Принципы организации информационной безопасности встраиваемых систем	
<i>Жариков А. М., Клоков В. А.</i>	187
Обзор современной электронной базы, применимой при построении приемных трактов гидроакустических систем	
<i>Дегтярев А. А., Мокрецов А. В.</i>	189
ТЕХНОЛОГИИ И КОМПОНЕНТЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	191
Технология формирования гетероструктур Ga(Al)N на кубическом карбиде кремния на кремнии (3C-SiC/Si) методом МОГФЭ	
<i>Федотов С. Д., Заварин Е. Е., Сахаров А. В., Цацульников А. Ф., Бабаев А. В., Стаценко В. Н., Кукушкин С. А., Гращенко А. С., Редьков А. В.</i>	191
Гетероструктуры Ga(Al)N на сверхвысокомном эпитаксиальном кремнии диаметром 150 мм для СВЧ и силовой электроники	
<i>Федотов С. Д., Заварин Е. Е., Сахаров А. В., Цацульников А. Ф., Соколов Е. М., Стаценко В. Н.</i>	194
Получение и исследование III-нитридных НЕМТ-гетероструктур с ультратонким барьером AlN	
<i>Гусев А. С., Шостаченко С. А., Горелов А. А., Добров А. В., Клочков А. Н., Кузнецов А. Л., Номоев С. А., Рындя С. М., Тертышная Ю. А., Каргин Н. И.</i>	196
Двухканальные гетероструктуры для мощных полевых транзисторов	
<i>Богданов С. А., Карпов С. Н., Пашковский А. Б.</i>	198
Моделирование процессов формирования GaN НЕМТ-структуры на оборудовании кремниевой технологии на пластинах диаметром 200 мм	
<i>Полушкин Е. А., Дорофеев А. А., Баранов Г. В., Маркин А. В.</i>	200
Спин-инжекционное ТГц-излучение в магнитных нанопереходах. 20 лет спустя	
<i>Панас А. И., Чигарев С. Г., Вилков Е. А., Бышевский-Конопко О. А., Загорский Д. Л., Долуденко И. М.</i>	202
Проблемы прогнозирования времени хранения информации микросхем памяти на основе EEPROM-ячеек	
<i>Селецкий А. В., Соловьев А. В., Кравцов А. С.</i>	205
Экстраполяционный метод оценки времени хранения логического состояния ячейки энергонезависимой памяти SONOS	
<i>Червонный Д. В., Арилин Р. А., Большев Д. И.</i>	207
Состояние и перспективы новых разработок прецизионных радиационно стойких микросхем операционных усилителей с малыми входными токами производства АО «Ангстрем»	
<i>Трудновская Е. А., Воробьев А. Д., Гамарц И. А., Лапшина Е. В.</i>	209
Разработка пластин с кристаллами заказанных элементов	
<i>Лукошко Г. К., Депутатов Д. А., Жаворонкин Ю. Г., Моисеенко Н. Ф., Коньков Р. С.</i>	211

Исследование деградации МОП-транзисторов под воздействием горячих носителей при использовании квазистатической методики испытаний <i>Елисеева Д. А., Максимов Д. А.</i>	213
Формирование и исследование тонких пленок диэлектриков для применения в новых типах памяти и транзисторных структурах, сформированных методом атомно-слоевого осаждения и низкотемпературного радикального окисления <i>Резванов А. А., Зюзин С. С., Горохов С. А., Ганыкина Е. А., Гвоздев В. А., Резник А. А., Черняев М. В.</i>	216
Особенности организации процесса контроля толщин тонких металлических пленок в производственном цикле <i>Волоховский А. Д., Нелюбин И. В., Горноста́й-Польский В. С.</i>	218
Пространственная корреляция как фактор, связывающий наблюдаемую и полную дисперсию параметров полупроводниковых пластин <i>Майоров А. С.</i>	221
Разработка методики in-line-контроля геометрических параметров фоторезистивных масок с помощью оптической скаттерометрии <i>Нелюбин И. В., Волоховский А. Д.</i>	224
Корпуса для микросхем автомобильной электроники. Анализ требований <i>Евстигнеев С. В., Сынгаевский В. А., Мозгов С. А., Кривопа́лов Д. М.</i>	226
Применение имплантационно-диффузионной технологии для создания фотодиодов и детекторов ядерных частиц <i>Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.</i>	229
Преимущества автоматического монтажа кристаллов на мягкий припой в форми́р-газе при сборке силовых элементов <i>Иванов В. И.</i>	231
Оптимизация травления оксидного слоя при формировании TSV-структур <i>Суханов Д. А.</i>	233
Особенности производства и модернизация технологического маршрута и процессов изготовления AMR-преобразователей сенсоров на основе анизотропных магниторезистивных пленок для систем автоматки, управления и навигации <i>Романов Д. А., Яковлев О. Ю., Юров А. С., Миронов В. П.</i>	236
Определение энергии активации процесса деградации ячеек памяти EEPROM по критерию сохранности состояния <i>Соловьев А. В., Селецкий А. В., Темирбулатов М. С., Ашанин М. Е., Морозов Е. Н.</i>	238
Сравнительный анализ ReRAM на базе high-k-диэлектриков <i>Макеев В. В.</i>	240
Формирование волноводных структур методом плазменного травления через фоторезистивную маску для производства фотонных интегральных схем <i>Терентьев А. В., Абросимов В. Ю., Светиков В. В., Розанов Р. Ю., Фролова Г. В.</i>	243

Влияние отжига на температурный коэффициент сопротивления терморезистивного слоя оксида ванадия <i>Ерастов Д. А., Жукова С. А., Ульянов С. А., Трошин Б. В., Столяров Д. Е., Шкаликов М. С.</i>	245
Влияние методов сухого травления на электрические характеристики и спектры глубоких центров в наносветодиодах <i>Поляков А. Я., Ли И.-Х., Ким Т.-Х., Черных А. В., Скорилов М. Л., Якимов Е. Б., Александян Л. А., Шемеров И. В., Васильев А. А., Пиртон С. Дж.</i>	248
Исследование адгезивных свойств эластичных кремнийорганических компаундов <i>Жумагали Р. Н., Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П., Гладкова С. И.</i>	252
Методы повышения отказоустойчивости микросхем памяти ReRAM с учетом разброса по количеству операций записи <i>Теплов Г. С., Константинов В. С., Петрова С. И.</i>	254
Исследование влияния режимов термического окисления на форму и размеры острия кремниевых игл кантиллеров <i>Новак А. В., Яворская М. Р., Ковалев В. Д., Соколов А. М.</i>	256
Метод практической оценки требований к допускам на линейные размеры элементов топологии фотошаблонов для проекционной фотолитографии <i>Балан Н. Н., Жаворонкин Ю. Г., Иванов В. В., Панкратов А. Л.</i>	259
Применение локальной перекристаллизации кремния методом термомиграции жидких зон в технологии силовой электроники <i>Середин Б. М., Попов В. П., Гаевус И. В., Малибашев А. В., Скиданов А. А.</i>	261
Исследование процессного окна Fin-слоя в процессе самосовмещенного двойного паттернирования <i>Тихонова Е. Д., Горнев Е. С.</i>	263
Формирование массивов металлических наночастиц на поверхности твердого тела для чувствительных слоев электронных устройств <i>Гришин Т. С., Волкова Л. С., Поляков М. В., Михайлов И. А., Громов Д. Г.</i>	266
Формирование чувствительных слоев на основе наностолбиков TiO _x для электронных устройств <i>Волкова Л. С., Гришин Т. С., Поляков М. В., Михайлов И. А., Громов Д. Г.</i>	268
ДОВЕРЕННЫЕ РЭУ И ЭКБ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	270
Концепция разработки проекта базовой методики оценки соответствия ЭКБ требованиям по стойкости к воздействию ИИ КП <i>Протопопов Г. А., Крылов Д. Г., Чубунов П. А., Скоркин И. В.</i>	270
Чувствительный элемент для регистрации ЛПЭ ТЗЧ в бортовых электронных системах космических аппаратов <i>Бакеренков А. С., Чубунов П. А.</i>	271

Влияние мощности дозы фотонного излучения на величину выхода заряда в подзатворном оксиде МОП-структур <i>Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.</i>	272
Компенсационный метод повышения стойкости линейного стабилизатора напряжения <i>Дербунов И. В., Брюшно Н. А., Данцев О. О., Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А.</i>	275
Методология разработки LC-генераторов, управляемых напряжением <i>Савченко Е. М., Сурков Н. С., Кузьмин А. Д., Брынцев И. В.</i>	277
Сравнительный анализ результатов исследования стойкости электронных компонентов к одиночному и многократному воздействию импульсом напряжения <i>Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К.</i>	279
Наногетероструктурные <i>p-i-n</i> GaAs/AlGaAs соединительные туннельные диоды для многопереходных лазерных фотопреобразователей <i>Толкачев И. А., Калиновский В. С., Контрош Е. В., Климко Г. В., Малеев Н. А., Прудченко К. К., Юферев В. С.</i>	283
Технология характеристики радиочастотного тракта контроллера систем цифровой маркировки <i>Ермаков А. В., Сотсков Д. И., Амбуркин К. М., Зубаков А. В., Усачёв Н. А.</i>	286
Технология и средства СВЧ-характеристики базовых элементов технологических библиотек на пластине в диапазоне до 110 ГГц <i>Амбуркин К. М., Жидков Н. М., Усачев Н. А.</i>	288
Особенности проектирования электрически перестраиваемых полосовых фильтров в интегральном исполнении <i>Дрозденко Е. С., Кульгашова А. П., Суворов А. И.</i>	291
Библиотека базовых элементов и функциональных блоков отечественных приемо-передающих БИС УВЧ-диапазона <i>Сотсков Д. И., Зубаков А. В., Усачев Н. А., Жидков Н. М., Ермаков А. В.</i>	293
Цифровые модели базовых элементов технологических библиотек: технологии восстановления параметров и верификации <i>Жидков Н. М., Амбуркин К. М., Новиков М. А., Сотсков Д. И., Усачев Н. А.</i>	295
Программные средства синтеза пассивных элементов технологических библиотек <i>Новиков М. А., Жидков Н. М., Усачев Н. А.</i>	297
Создание кооперации для разработки микроэлектронных программно-конфигурируемых радиосистем <i>Савченко Е. М., Будяков А. С., Пронин А. А.</i>	299
Особенности разработки усилителя средней мощности в диапазоне частот 90–100 ГГц <i>Макарец И. В., Беляков В. А., Фефелов А. Г., Оболенский С. В., Дюков Д. И.</i>	300

Разработка и верификация модели магнитного туннельного перехода <i>Лобкова М. Д., Скиртков П. Н., Звездин К. А.</i>	302
Интерпретация алгоритмов быстрых косинусных преобразований для энергоэффективных ассоциированных алгебраических структур на основе ПЛИС <i>Турбин Д. С., Краснюк А. А.</i>	303
Критерии цифровой гигиены для реализации некоторых концепций корпоративных технологий PLM <i>Петров К. А., Корнеева Е. В., Краснюк А. А.</i>	306
Автоматизация поиска оптимальных входных параметров при проектировании СБИС <i>Желудков Н. В., Кочева Е. С., Евлампиев Б. Е., Ткаченко Е. В.</i>	309
Косимуляция СнК высокопроизводительного микропроцессора на ПЛИС и на RTL-симуляторе через интерфейс PCIe <i>Ворсин А. Г., Петров К. А., Зубковский П. С.</i>	311
Исследование лазерным термоволновым методом тепловых свойств контактов полупроводник — керамика, спаянных пастами различных составов <i>Прудченко К. К., Глазов А. Л., Калиновский В. С., Контрош Е. В., Муратилов К. Л.</i>	313
Проективная модель измерений. Проективные АЦП <i>Цыбульский О. А.</i>	315
Варианты проверки энергоэффективных генераторов случайных чисел для встроенных систем <i>Лысенко Е. В., Лагутенко Д. В., Панин А. Д.</i>	318
Применение методов виртуализации для обеспечения доверенности и информационной безопасности устройств встраиваемых систем <i>Храмов С. О., Жариков А. М., Клоков В. А.</i>	320
Исследование надежности алюминиевой металлизации доверенных интегральных схем при повышенных температурах <i>Афанасьев М. С., Беспалов А. В., Гераськин А. А., Голикова О. Л., Куликов Д. В., Муравьева А. А., Смирнов Д. О., Харитонов И. А., Шабардин Р. С.</i>	322
Процедуры контроля доверенности при разработке ЭКБ в САПР с открытым исходным кодом <i>Аряшев С. С., Корнеева Е. В., Краснюк А. А., Петров К. А.</i>	323
Подсистема верификации на основе цепочек доверия нетлиста программной модели доверенной СБИС <i>Аряшев С. С., Краснюк А. А.</i>	326
Аналитическая зависимость накопленного в МОП-транзисторе заряда от длины пробега тяжелой заряженной частицы при различных углах ее пролета <i>Глушко А. А., Гусев М. Р., Морозов С. А.</i>	329

СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И СИСТЕМ.....	332
Анализ алгоритмов и методов оптимизации логического синтеза, их сравнение и реализация в современных САПР микроэлектроники <i>Мальшев Н. М.</i>	332
Методы и алгоритмы топологической проверки взаимосогласованных приборов и генерации фиктивных топологических элементов во взаимосогласованных структурах <i>Равилов М. Ф.</i>	334
Экстракция паразитных приборов и параметров методом разбиения на конечные элементы для учета растекания токов в межсоединениях высокомощных ДМОП-транзисторов <i>Равилов М. Ф., Евстигнеев С. В.</i>	336
Verilog-A-модель эффекта вымораживания примеси в LDD-областях при криогенных температурах <i>Осыкин А. А., Потупчик А. Г., Панышев К. А.</i>	339
Продвинутая автоматизация тестирования сложнопараметризованных топологических ячеек PDK для автоэлектроники <i>Слезкин В. В., Бритвин А. А., Кондратьев С. А.</i>	341
Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм <i>Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Новиков А. А., Шипицин Д. С.</i>	343
Подсистема миграции иерархических СФ-блоков <i>Керре А. Л., Сотников М. А., Розенфельд В. П., Смирнов Ю. Г.</i>	346
Подход к автоматизированному синтезу схем и топологий СВЧ интегральных схем на примерах секций аттенюатора и фазовращателя <i>Сальников А. С., Добуш И. М., Горяинов А. Е., Калентьев А. А., Файль Т. Н., Билевич Д. В., Метель А. А.</i>	349
Подсистема автоматизированного синтеза квалификационных ячеек для аттестации правил физической верификации топологии ИС <i>Розенфельд В. П., Смирнов Ю. Г., Керре А. Л., Сотников М. А.</i>	351
Оптимизация синтеза самосинхронных схем <i>Плеханов Л. П.</i>	354
Применение открытых IP-ядер для построения СнК с Linux <i>Елизаров С. Г., Лукьянченко Г. А., Михайлов Д. В., Монахов А. М.</i>	356
Практические аспекты IR Drop-анализа для СБИС уровня 28 нм <i>Забабурин А. Ю., Савин С. В., Титов А. И., Чекмазов П. Ю., Шипицин Д. С.</i>	358
Оценка средствами TCAD стойкости ячеек памяти СОЗУ к воздействию ОЯЧ при уменьшении проектных норм до 28 нм <i>Петросяня К. О., Харитонов И. А., Силкин Д. С., Попов Д. А., Исмаил- Заде М. Р., Переверзев Л. Е., Морозов А. А., Тургенев П. В., Шипицин Д. С., Ласточкин О. В.</i>	360

Поддержка в PDK инструментария для разработки СВЧ ИС в стандартной КМОП-технологии	
<i>Загидуллина О. Р., Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицин Д. С.</i>	362
Особенности моделирования интегральных схем модуляции и демодуляции с мемристорными приборами	
<i>Русаков С. Г., Ульянов С. Л.</i>	364
Вычислительная процедура моделирования многопериодных режимов в нелинейных цепях с мемристорными приборами	
<i>Русаков С. Г., Ульянов С. Л.</i>	365
Использование компилированных математических выражений на основе лямбда-функций для вычисления значений параметров элементной базы PDK	
<i>Тюрин А. В., Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицин Д. С.</i>	367
Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ	
<i>Верник П. А., Власов С. Е., Аряшев С. И.</i>	369
Развитие отечественной САПР: тренды, решения, компетенции	
<i>Иванова Е. Н.</i>	371
Библиотека SPICE-моделей электронных компонентов РЭА и методы экстракции их параметров для гражданских и специальных применений	
<i>Петросяц К. О.</i>	372
Разработка подсистемы топологического проектирования САПР СБИС	
<i>Сазонов В. В., Шеблаев М. В.</i>	373
Экосистема проектирования интегральных схем на основе Bill of Materials	
<i>Сорокин Т. М., Бабинцев А. В., Никончук С. В.</i>	375
Разработка отечественных средств интерактивной отладки, анализа и оптимизации СБИС на вентильном уровне для открытого цифрового маршрута проектирования	
<i>Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Коршунов А. В.</i>	376
Основные ограничения САПР с открытым исходным кодом на примере разработки базовых компонентов СБИС управления матричным дисплеем	
<i>Шипицин Д. С., Ласточкин О. В., Титов А. И., Забабурин А. Ю., Клычков Ф. С., Яструбинский Н. А.</i>	379
Проблематика разработки командных файлов для средств физической верификации DRC и LVS для САПР с открытым исходным кодом	
<i>Милютин С. В., Надин А. С., Шипицин Д. С.</i>	381
Особенности верификации моделей межсоединений с использованием кольцевых генераторов	
<i>Потупчик А. Г., Нуштаев А. В.</i>	383
Разработка маршрута верификации DRC для САПР с открытым исходным кодом на примере KLayout	
<i>Загидуллина О. Р., Надин А. С., Шипицин Д. С.</i>	386

СВЧ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МОДУЛИ.....	388
Разработка и реализация политики научно-технического развития производства СВЧ-транзисторов, МИС и чиплет-модулей на основе широкозонных полупроводниковых материалов в АО «НПП «Исток» им. Шокина»	
<i>Борисов А. А., Буробин В. А.</i>	388
Особенности технологического базиса производства GaAs/GaN МИС СВЧ для отечественных дизайн-центров и fabless-компаний	
<i>Кищинский А. А., Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С.</i>	391
Универсальный приемо-передающий канал АФАР X-диапазона на основе СВЧ МИС собственной разработки	
<i>Кищинский А. А., Кондратенко А. В., Бутерин А. В., Иванов А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С., Щербаков А. С., Миннебаев В. М., Миннебаев С. В., Редька Ал. В.</i>	392
Проектирование монолитного СВЧ-усилителя F-класса	
<i>Дудинов К. В., Заднепрная Н. И.</i>	394
Разработка для авиационно-космических радиоэлектронных систем на отечественной элементной базе фильтров радиопомех частотного диапазона 9 кГц — сотни МГц, обеспечивающих наиболее жесткие требования допустимого уровня электромагнитных помех	
<i>Дмитриков В. Ф., Исаев В. М., Куневич А. В., Павлов С. В., Шушпанов Д. В.</i>	398
Интеллектуальная САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец» и ее применение для синтеза малозумящих усилителей	
<i>Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Метель А. А.</i>	401
Особенности разработки усилителя промежуточной частоты по технологии НВТ на подложке GaAs	
<i>Макарец И. В., Беляков В. А., Фефелов А. Г., Дюков Д. И., Елагина Е. И.</i>	403
Сверхширокополосный малозумящий распределенный усилитель на основе каскадной GaAs транзисторной ячейки для применения в высокопроизводительных измерительных комплексах	
<i>Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И., Каргин Н. И., Гузньева Е. А.</i>	406
Современные требования к разработке и функциональности моделей СВЧ-транзисторов для проектирования интегральных схем	
<i>Попов А. А., Добуш И. М., Сальников А. С., Дудинов К. В., Емельянов А. М., Зыков Д. Д., Подвигалкина Н. О.</i>	409
Обобщение технических требований к устройствам на пластине с копланарной линией передачи при разработке структуры метрологической системы измерений их СВЧ-характеристик	
<i>Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Пивак А. В., Раков А. В., Семенов В. А., Чирков И. П.</i>	411



Преимущества использования элементного базиса SiGe БиКМОП при разработке СФ-блоков быстродействующих микросхем <i>Савченко Е. М., Пронин А. А., Аредов А. А.</i>	413
Разработка микросхем An4140 и An4259 и технологии изготовления СВЧ КМОП ИС на структурах ультратонкого кремния на сапфире <i>Кечко И. Е., Кошелева Г. С., Метлов В. А., Романов А. А.</i>	415
Разработка усилителя с контролируемым коэффициентом усиления на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии для приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона <i>Коколов А. А., Ходжиков Д., Бабак Л. И.</i>	417
Применение метода последовательных приближений как средства автоматического поиска оптимальных режимов работы измеряемого устройства <i>Караванов И. М., Медвехкв Н. С., Сметанин В. В.</i>	419
Увеличение емкости представляемой информации об СВЧ-измерениях посредством автоматического выпуска интерактивной документации <i>Сметанин В. В., Медвехкв Н. С.</i>	420
Разработка отечественных ваттметров СВЧ-диапазона для испытаний и настройки приемо-передающих устройств <i>Малай И. М., Матвеев А. И., Семенов В. А., Чирков И. П.</i>	421
Особенности микрополосковой СВЧ-нагрузки высокого уровня мощности для ферритовых вентилей <i>Семенов Д. А., Сквородников С. В.</i>	423
Исследование и разработка квадратурного модулятора с регулируемым коэффициентом передачи <i>Калёнов А. Д.</i>	424
МИКРОСИСТЕМЫ. СЕНСОРЫ И АКТЮАТОРЫ	426
Разработка микрозеркала с высокоаспектным встречно-штыревым актюатором на базе технологии «кремний на стекле» <i>Баклыков Д. А., Стукалова В. Е., Соловьев А. А., Третьяк А. С., Константинова Т. Г., Башинова М. В., Родионов И. А.</i>	426
Опыт разработки микромеханических датчиков физических величин <i>Блинов Н. Н.</i>	428
Применение пассивных беспроводных акустоэлектронных датчиков <i>Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А.</i>	429
Конструкция и технология изготовления многоуровневой сборки 3D-микросистемы цифровой части ЛЧМ-радары с торцевой коммутацией <i>Вертянов Д. В., Сидоренко В. Н., Жумагали Р. Н., Беляков И. А.</i>	431

Методы формирования шунтирующих полосок с высоким аспектным соотношением для АМР-датчиков с повышенной чувствительностью <i>Грабов А. Б., Баранов А. А., Дидык П. И., Котельников А. С., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.</i>	434
Разработка МЭМС-сенсоров на тепловом принципе для определения параметров газовых сред <i>Дюжнев Н. А., Орешкин Г. И., Денисов В. Е., Филиппов Н. А., Парамонов В. В., Чиненков М. Ю.</i>	436
Отладочный комплект для комплексного тестирования инерциально-спутниковой навигационной системы на базе МЭМС-датчиков <i>Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Галкин А. А.</i>	437
Датчик магнитного поля на основе АМР-эффекта <i>Грабов А. Б., Баранов А. А., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.</i>	439
Исследование возможности применения угловых молекулярно-электронных датчиков для создания малогабаритной скорректированной курсовертикали для беспилотных летательных аппаратов <i>Зайцев Д. Л., Жубанышкалиев А., Тарасенко А. Б.</i>	441
Разработка роботизированного комплекса для отладки и исследования систем технического зрения, ориентации и навигации средствами автоматизированного проектирования <i>Галкин А. А., Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П.</i>	445
Технология формирования трехслойной кремниевой МЭМС-структуры <i>Фролов Е. Н., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.</i>	448
Повышение устойчивости чувствительного элемента микромеханического акселерометра маятникового типа к ударным нагрузкам <i>Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.</i>	449
Актуаторы для микроэлектромеханических систем <i>Уваров И. В.</i>	452
Моделирование сложной гетероструктуры InGaAs/InAlAs ОЛФД <i>Фильяев А. А., Лосев А. В., Заводиленко В. В., Павлов И. Д.</i>	455
Разработка и исследование работы многофункционального модуля отслеживания грузов <i>Чельшев Л. С., Большев Ф. С., Керобян М. С., Орлов В. М.</i>	457
Разработка конструкции и технологии изготовления торсионного МЭМС-микрозеркала с электростатическим управлением <i>Дюжнев Н. А., Орешкин Г. И., Филиппов Н. А., Чиненков М. Ю., Ким П. П., Белова С. Д.</i>	460
Pin-структура как детектор нейтронных потоков <i>Яшин В. С., Федоренко В. В.</i>	461

Матричная технология измерений. Точность измерения координат элементов и контроль фотошаблонов <i>Королев А. Н., Лукин А. Я., Филатов Ю. В.</i>	463
Инфракрасные сенсоры на кремниевых МЭМС <i>Фетисов Е. А.</i>	464
Технологические особенности процессов металлизации и формирования вертикальных соединений в 3D-микросборках с торцевой коммутацией <i>Вертянов Д. В., Беляков И. А., Жумагали Р. Н., Кочергин М. Д., Тимошенко С. П.</i>	467
Минимизация шероховатости боковых поверхностей формируемых структур в процессах глубокого анизотропного плазменного травления кремния <i>Парамонов В. В., Сомов Н. М., Потапенко И. В., Голишиников А. А., Путря М. Г.</i>	470
Создание сенсорной системы позиционирования и интерпретации жестов <i>Чельшев Л. С.</i>	473
Измерения диэлектрических характеристик материалов микрополосковых печатных плат <i>Метельков П. В., Савельев М. В., Сизов В. И., Поликарпов Д. В.</i>	477
КМОП фоточувствительные микросхемы и коммутаторы для низкотемпературных ИК-приемников разработки ООО «РТК Индекс» и отечественного изготовления <i>Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Барсуков Ю. А., Волкова С. Ю.</i>	479
Анализ распределения температуры в трехмерной микросистеме с несколькими функциональными уровнями <i>Евстафьев С. С., Соловьев И. А., Вертянов Д. В.</i>	482
ФКБ. Моделирование и проектирование <i>Шамин Е. С., Скуратов И. Д., Крылов А. А., Светиков В. В.</i>	484
Перспективные элементы наноэлектроники на базе нанокристаллов антимолибдита индия <i>Жуков Н. Д.</i>	486
Разработка и исследование кремниевых микроакселерометров для создания комплексированных интеллектуальных МЭМС <i>Ие Ко Ко Аунг, Орлов В. О., Чельшев Л. С.</i>	488
Низкотемпературный термокомпрессионный бондинг с применением индия для герметизации в технологии МЭМС <i>Кошелев В. А., Парамонов В. В., Филиппов Н. А., Демин Г. Д., Дюжев Н. А., Чиненков М. Ю.</i>	489
Микромагнитные особенности эффекта гигантского магнитоимпеданса в тонкопленочной ферромагнитной структуре при различном направлении внешнего магнитного поля <i>Демин Г. Д., Федина А. Д., Лобанов Б. В., Дюжев Н. А.</i>	491
Влияние одномерных механических деформаций на конструкцию эластичного носителя с металлическими проводниками различной формы <i>Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П., Жумагали Р. Н., Гладкова С. И.</i>	494

Применение электрохимических преобразователей <i>Дудкин П. В., Криштон В. Г.</i>	497
Микросистема анализа ферментативной активности для неонатального скрининга <i>Шешиль А. К., Панова О. С., Комарова Н. В., Грудцов В. П., Рязанцев Д. В., Кузнецов А. Е.</i>	499
Биосенсорная система для определения кардиомаркера тропонина I на основе ион-чувствительного полевого транзистора и аптамеров <i>Шешиль А. К., Панова О. С., Титов А. А., Грудцов В. П., Рязанцев Д. В., Комарова Н. В.</i>	500
СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	501
Ключевые особенности технологического оборудования GaN-изделий <i>Маркин А. В., Полушкин Е. А., Баранов Г. В., Дорофеев А. А.</i>	501
Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5 — переход от R&D к производственно-ориентированному уровню <i>Алексеев А. Н., Новиков С. А., Марасин О. Д., Петров С. И.</i>	503
Разработка и внедрение линейки перспективного оборудования для КМОП- и GaN-технологий <i>Костюков Д. А., Шубников А. В., Щуренкова С. А.</i>	505
Разработка установки МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия на подложках диаметром до 200 мм для производства силовых транзисторов <i>Бирюков М. Г., Афонин П. Е., Щуренкова С. А., Пугачев Д. Ю., Заварин Е. Е., Сахаров А. В., Цацульников А. Ф., Базаревский Д. С., Стаценко В. Н., Федотов С. Д.</i>	507
Применение электростатического прижима в микроэлектронике <i>Черкунов В. И., Ширяев М. Е., Челапкин Д. Г., Бабич А. В.</i>	509
Разработка электронно-лучевых испарителей, плазменных и ионно-лучевых установок травления в «Эпос-Инжиниринг» <i>Безруков И. А., Глухов И. М., Кривенко А. С., Шичалин К. В., Шишкин Е. А.</i>	511
Применение печей вакуумной пайки для ответственных компонентов <i>Зюбер Д. И., Шаталин А. С.</i>	513
Автоматизированные системы управления процессами выращивания монокристаллов <i>Бородин А. В., Бородин В. А., Юдин М. В., Францев Д. Н.</i>	516
Алгоритм машинного зрения для измерения диаметра монокристалла кремния в процессе его выращивания из расплава методом Чохральского <i>Францев Д. Н.</i>	518



Развитие и использование аппаратно-программной системы («НаноМейкер») для управления процессами литографии и проектирования структур в микронаноэлектронике <i>Зайцев С. И., Свинцов А. А.</i>	521
Разработка перспективного отечественного лабораторного литографа для электронно-лучевой литографии <i>Князев М. А., Зайцев С. И., Свинцов А. А., Митюхляев В. Б.</i>	523
Технология сверхиндуктивной резонансной плазмы <i>Виноградов Г. К.</i>	524
Тенденции и перспективы развития лазерного технологического оборудования для микроэлектронных производств <i>Сапрыкин Д. Л., Тужилин Д. Н.</i>	527
Особенности построения базовых подсистем установки монтажа кристаллов <i>Зеленский А. А., Аленко А. В., Харьков М. А., Абдуллин Т. Х.</i>	529
Управляемое формирование острия кантилеверов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков <i>Коломийцев А. С., Котосорова А. В.</i>	532
Надежность чистых производственных помещений при эксплуатации <i>Медведовский М. Д., Маркин А. В.</i>	535
НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ	538
Нейроморфное онлайн-обучение с подкреплением с мемристовой пластичностью <i>Власов Д. С., Миннеханов А. А., Рыбка Р. Б., Давыдов Ю. А., Сбоев А. Г., Серенко А. В., Ильясов А. И., Демин В. А.</i>	538
Современное состояние и перспективы КМОП-интеграции мемристовых устройств <i>Михайлов А. Н., Грязнов Е. Г., Коряжкина М. Н., Лукоянов В. И., Слияков Ю. Г., Андреева Н. В., Смирнов В. А., Федотов А. А.</i>	540
Аналоговые нейронные и синаптические КМОП-элементы с цифровым управлением для аппаратной реализации импульсных нейронных сетей <i>Рындин Е. А., Андреева Н. В.</i>	542
Интеллектуальные программные системы для создания ячеек энергонезависимой памяти <i>Абгарян К. К.</i>	546
Интеллектуальные системы для организации многомодального человеко-машинного взаимодействия <i>Карпов А. А.</i>	547
Популяционная динамика спайковых нейронных сетей при решении задач вычислительной нейронауки <i>Масленников О. В.</i>	549

Гомотопически расширенные нейронные операторы для решения дифференциальных уравнений в частных производных <i>Герасимов И. В., Седунов С. А.</i>	551
Методы исследования эволюции мемристора на основе анализа серии его переключений <i>Жевненко Д. А., Мещанинов Ф. П., Теплов Г. С., Горнев Е. С.</i>	552
Нейроморфный процессор «АЛТАЙ» для решения задач обработки сигналов в реальном времени <i>Канлер В. М.</i>	554
Перколяционные мемристивные системы наночастиц для резервуарных вычислений <i>Василевская Ю. О., Савицкий А. И., Сибатов Р. Т.</i>	556
Моделирование процессов многоуровневого переключения элементов энергонезависимой резистивной памяти, необходимых для создания нейроморфных систем <i>Ковешников С. В., Ванькаев А. С., Ключина Е. В., Федотов М. И.</i>	558
Нейроморфные фотомемристормые сенсоры для автономного распознавания образов <i>Панин Г. Н., Капитанова О. О.</i>	560
Электрическая схема запоминающего устройства нейропроцессора на основе мемристорно-диодного кроссбара и периферийной управляющей КМОП-логики <i>Писарев А. Д., Удовиченко С. Ю., Бусыгин А. Н.</i>	562
Массивы кроссбар-мемристоров на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$ для нейроморфных приложений <i>Емельянов А. В., Ильясов А. И., Мацукатова А. Н., Черноглазов К. Ю., Ситников А. В., Рыльков В. В., Демин В. А.</i>	565
Формирование пленок оксидов металлов для создания нейроморфных структур машинного зрения робототехнических комплексов <i>Вакулов З. Е., Томинов Р. В., Дзюба Д. А., Хахулин Д. А., Казанцев В. Б., Смирнов В. А.</i>	567
ZnO мемристормые структуры: многоуровневое резистивное переключение и нейроморфные применения <i>Томинов Р. В., Варганов В. И., Узрюмов И. С., Вакулов З. Е., Казанцев В. Б., Смирнов В. А.</i>	569
Динамические мемристоры на основе сегнето- и антисегнетоэлектрических материалов <i>Ханас А. Р., Hebert C., Vecerra L., Сизых Н. А., Жидков Н. С., Jedrecy N., Зенкевич А. В.</i>	570
Методы машинного обучения в управлении роботами со сложной локомоцией на основе обобщенной задачи динамического уравновешивания <i>Горобцов А. С., Орлова Ю. А., Рыжов Е. Н., Донская А. Р.</i>	572



Обратный инжиниринг исследований и разработок в области автономных робототехнических систем <i>Дорофеев В. П.</i>	574
Алгоритмы и аппаратная реализация взаимодействия с живой тканью через мультиэлектродный массив <i>Тельминов О. А.</i>	576
Нейросетевой анализ обработки выходного сигнала акустических волн в датчиках жидкости <i>Воронова Н. В., Тельминов О. А.</i>	578
Общая функциональная схема элемента колебательного типа для спайковых нейроморфных систем <i>Матюшкин И. В.</i>	580
Методы машинного обучения для задач разработки элементной базы <i>Жевенко Д. А., Мещанинов Ф. П., Кожевников В. С., Кузнецов С. Е., Магомедрасулов А. М., Харченко Е. Л., Чернова А. С., Горнев Е. С.</i>	583
КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	586
Разработка источников одиночных фотонов для систем квантового распределения ключей <i>Торопов А. А., Малеев Н. А., Сорокин С. В., Седова И. В., Рахлин М. В., Галимов А. И., Серов Ю. М., Васильев А. П., Кузменков А. Г., Бобров М. А., Кулаева М. М., Задиранов Ю. М., Трошков С. И., Шубина Т. В.</i>	586
Квантовые коммуникации через атмосферные каналы связи <i>Кулик С. П.</i>	588
Проблемы создания систем квантового распределения ключей для магистральных линий большой протяженности <i>Нефедов С. И., Ожегов Р. В., Евсютин О. О.</i>	589
Разработка методов совместной передачи квантовых и информационных каналов в одном оптическом волокне <i>Егоров В. И., Воронцова И. О., Гончаров Р. К., Тарабрина А. Д., Туяков Д. В., Смирнов С. В., Чистяков В. В., Киселев Ф. Д.</i>	591
На пути к промышленной системе квантового распределения ключей с недоверенным центральным узлом <i>Шаховой Р. А.</i>	592
Разработка и создание системы квантовой коммуникации на непрерывных переменных <i>Самсонов Э. О.</i>	593
Коррелированные оптико-терагерцевые бифотоны: генерация и применение <i>Китаева Г. Х., Прудковский П. А., Кузнецов К. А., Леонтьев А. А., Сафроненков Д. А., Новикова Т. И.</i>	594

Практическая безопасность квантового распределения ключа при наличии побочных каналов утечки информации <i>Сыч Д. В.</i>	596
О методах оптимизации в моделях открытых квантовых систем для задач квантовых технологий <i>Печень А. Н.</i>	598
Уязвимость квантовой криптографии с фазово-временным кодированием в условиях затухания <i>Кронберг Д. А.</i>	599
Разработка методов развития магистральных и локальных квантовых сетей различных топологий на основе доверенных промежуточных узлов <i>Сантьев А. А., Наливайко И. П., Алексеев А. Л.</i>	600
Квантовые алгоритмы для шумных кудитных процессоров промежуточного масштаба <i>Николаева А. С., Киктенко Е. О., Федоров А. К.</i>	602
Постселекция в открытых квантовых системах <i>Киктенко Е. О.</i>	604
Управление трансмон-кубитами биполярными последовательностями одноквантовых импульсов <i>Бастракова М. В., Вожаков В. А., Соловьев И. И., Клёнов Н. В.</i>	606
Применение высокочастотных транзисторов в устройствах квантового распределения ключей <i>Попов В. Г.</i>	608
Квантовая сеть МФТИ <i>Горина Е. В., Криштон В. Г., Андреев С. Н.</i>	610
Информационный подход к исследованию адекватности, полноты и точности квантовых измерений в приложении к квантовым вычислениям и коммуникациям <i>Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичёв В. Ф.</i>	612
Бенчмаркинг симуляторов квантовых компьютеров <i>Бантыш Б. И., Чернявский А. Ю.</i>	613
Энтропийное свойство алгоритма QAOA со случайным выбором параметров <i>Чернявский А. Ю., Бантыш Б. И.</i>	615
Квантовые модели навигации птиц с учетом декогерентизации и шумов <i>Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Чернявский А. Ю., Лукичёв В. Ф.</i>	617
От классической логики к квантовой (опыт разработки онлайн-курса по гранту МИЭТ) <i>Кузнецов Ю. А., Богданова Н. А., Колесникова К. А.</i>	619
Корректировка статистики считывания квантовых состояний с помощью модели нечетких измерений <i>Дмитриев И. А., Богданов Ю. И., Бантыш Б. И., Богданова Н. А., Лукичев В. Ф.</i>	621



Влияние квантовых шумов на качество реализации алгоритма квантовой телепортации	
<i>Гольшев И. К., Богданов Ю. И.</i>	622
Влияние амплитудной и фазовой релаксации на точность томографии многоуровневых квантовых состояний	
<i>Кокшаров К. Б., Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Кузнецов Ю. А., Лукичев В. Ф.</i>	623
Подавление декогеренции при передаче квантового состояния с помощью унитарных операций	
<i>Мастюкова А. С., Гавреев М. А., Киктенко Е. О., Федоров А. К.</i>	624
Использование обобщенных переполненных квазивероятностных представлений для минимизации негативности квантовых цепочек	
<i>Куликов Д. А., Яшин В. И., Федоров А. К., Киктенко Е. О.</i>	626
Сублинейная факторизация на основе квантового алгоритма приближенной оптимизации: препятствия	
<i>Гребнев С. В., Гавреев М. А., Киктенко Е. О., Гугля А. П., Ефимов А. Р., Федоров А. К.</i>	629
Формирование и исследование пленок Nb_xGe_{1-x} для сверхпроводниковых однофотонных детекторов	
<i>Хыдырова С. Ю., Ломакин А. И., Ковалюк В. В., Гольцман Г. Н., Моисеев К. М.</i>	631
Векторная магнитометрия с использованием одиночного комплекса $NV^{-13}C$ в алмазе	
<i>Салказанов А. Т., Васильев А. Н., Гусев А. С., Калошин М. М., Каргин Н. И., Кукин Н. С., Мурадова А. Р., Низоцев А. П., Семенов П. А., Пушкарчук А. Л.</i>	633
ОПТО- И ФОТОЭЛЕКТРОНИКА	635
Состояние работ и перспективы развития матричных ФПУ средневолнового ИК-диапазона спектра	
<i>Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Ерошенков В. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И.</i>	635
Матричные фотоприемники ИК-диапазона на основе нанодисперсных материалов	
<i>Попов В. С., Пономаренко В. П., Разумов В. Ф., Иванов В. В.</i>	636
Тонкая настройка качества изображения для вывода на экране OLED-микродисплеев с кремниевой СБИС управления	
<i>Забабурин А. Ю., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Шилицин Д. С.</i>	638
Обработка изображений в ОЭС на основе современных отечественных матричных охлаждаемых ИК ФПУ	
<i>Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Драгунов Д. Э., Лазарев П. С., Ляпустин М. Ю., Старцев В. В.</i>	640
Проблемы и пути создания охлаждаемого устройства мегапиксельного формата на диапазон спектра 3–5 мкм	
<i>Мирофанченко А. Е., Мирофанченко Е. В., Якушев Т. Ю.</i>	642

Создание и применение оптических термопластов с заданным ходом дисперсионной кривой	
<i>Агринский М. В., Агринский Н. Н., Откупман Д. Г., Попов В. К.</i>	644
Разработка кремниевого лавинного фотоумножителя непланарной конструкции	
<i>Виноградов С. Л., Жуков А. А., Ветчинин С. А., Дюжев Н. А., Чиненков М. Ю., Филиппов Н. А., Парамонов В. В., Денисов В. Е.</i>	646
Оптимизация конструкции гетероструктуры биполярного барьерного детектора на основе InGaAs/AlInAs	
<i>Савчук А. А., Чельный А. А., Ахмеров Ю. Л., Меженный М. В., Роговский Е. С., Жаркова А. А.</i>	648
Применение программных продуктов САПР для моделирования оптико-электронных, электромагнитных и термомеханических свойств перспективных матричных микроболومترических приемников ИК-излучения	
<i>Солодков А. А., Москвичев В. Ю., Шилейко Н. А.</i>	650
Фотоприемное устройство на основе матричного микроболومترического детектора со спектральным диапазоном чувствительности 2–16 мкм	
<i>Хафизов Р. З., Белоконов В. М., Москвичев В. Ю., Серов В. В., Шилейко Н. А., Шатунов Д. Ю., Сильницкая О. А.</i>	653
Регистрация импульсного терагерцевого излучения неохлаждаемыми матричными микроболومترическими приемниками	
<i>Демьяненко М. А., Старцев В. В., Москвичев В. Ю.</i>	655
Способ визуализации источников терагерцевого излучения	
<i>Наумов А. В., Старцев В. В., Жернаков А. С., Шаров А. А., Моисеев М. В.</i>	658
Рост аморфного оксида ванадия при реактивном электронно-лучевом испарении и характеристика скорости отклика резистивных фоточувствительных элементов	
<i>Кунцевич А. Ю., Таркаева Е. В., Блуменау М. И., Иевлева В. А., Дулебо А. И.</i>	660
Барьерно-диодные гетероструктуры на основе соединений A^3B^5 , содержащих сурьму	
<i>Кривобок В. С., Клековкин А. В., Савин К. А., Минаев И. И., Ерошенко, Аминов, Пашкеев Д. А., Ченцов С. И., Гончаров А. И., Николаев С. Н.</i>	661
Микроканальные электронные усилители: принцип работы и сферы применения	
<i>Кривов С. В.</i>	663
Лабораторное оборудование для литографии и работы с двумерными ван-дерваальсовыми гетероструктурами	
<i>Галиуллин А. А., Пугачёв М. В., Дулебо М. И., Кунцевич А. Ю.</i>	664
Печатные фотодетекторы для матричных ФПУ большой площади	
<i>Санджиева М. А., Алешин Д. К., Даниловский Э. Ю., Куприянова К. И., Каргапольцев С. В., Новоселов П. А.</i>	667



Получение высокочувствительных пленок PbSe для фотоприемников ИК-излучения	
<i>Мочалов Л. А., Кудряшов М. А., Прохоров И. О., Вишивцев М. А., Слаповская Е. А., Мирошников Б. Н., Мирошникова И. Н.</i>	669
Технологические направления разработок полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 для решения задач оптоэлектроники	
<i>Пихтин Н. А.</i>	672
Мощные полупроводниковые лазеры, фотоприемники и оптоэлектронные модули на их основе	
<i>Ладугин М. А.</i>	674
Применение гиперспектральной информации в виде дополненной реальности	
<i>Агринский М. В., Попов В. К., Серов В. В.</i>	676
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА, ВОЛОКОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	678
Разработки НИЯУ МИФИ в области интегральной фотоники и СВЧ электроники	
<i>Каргин Н. И., Гусев А. С., Васильевский И. С., Рыжук Р. В.</i>	678
Специальная элементная база для технологии гетерогенной сборки фотонных интегральных схем	
<i>Ковалев А. А., Певчих К. Э., Светиков В. В.</i>	680
Определение потерь в планарных оптических слоях различной контрастности при производстве фотонных интегральных схем	
<i>Левин Д. Д., Светиков В. В., Стебельков А. Н.</i>	682
Современные подходы к созданию лазерных источников на основе полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 для кремниевых фотонных интегральных схем	
<i>Слипченко С. О., Малеев Н. А., Блохин С. А., Певчих К. Э., Светиков В. В., Пихтин Н. А.</i>	684
Вертикально-излучающие лазеры спектрального С-диапазона с полосой модуляции свыше 10 ГГц	
<i>Воропаев К. О., Воропаева И. О., Блохин С. А., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Егоров А. Ю.</i>	686
Квантово-каскадные лазеры диапазона длин волн 4–8 мкм	
<i>Соколовский Г. С.</i>	689
Поверхностные состояния на границе между двумя трехмерными топологическими изоляторами BSTS	
<i>Пугачев М. В., Шуплецов А. В., Кунцевич А. Ю.</i>	690
RAM4 DSP для приемо-передатчиков с дальностью передачи до 80 км в целях использования в распределенных центрах обработки данных	
<i>Иванов Д. М., Елизаров С. Г.</i>	692

Влияние неравномерности технологического процесса изготовления интегральных фотонных схем на повторяемость оптических свойств <i>Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Габидуллина Л. А., Желтиков В. А., Шишкин А. В., Сороковых Д. Е., Денисов А. А.</i>	695
Фотонные интегральные схемы для систем квантового распределения ключей <i>Криштоп В. Г., Борисова А. В., Певчих К. Э., Светиков В. В.</i>	696
Разработка и создание отдельных элементов гибридных фотонных интегральных схем для оптических вычислений, коммуникаций и сенсоров <i>Ковалюк В. В., Ан П. П., Голиков А. Д., Проходцов А. И., Кузин А. Ю., Флоря И. Н., Венедиктов И. О., Седых К. О., Святодух С. С., Хыдырова С., Кобцев Д. М., Галанова В. С., Кривенков Т. И., Касимов Р. Х., Гольцман Г. Н.</i>	698
Конструктивно-технологическое решение для создания многослойного керамического модуля с интегрированными оптическими и электрическими линиями связи <i>Косевской В. А., Кваша М. Ю., Плугин А. А.</i>	700
Лазерное освещение <i>Ахмеров Ю. Л., Савчук А. А., Жаркова А. А., Чельный А. А.</i>	702
Полупроводниковые лазеры для дальномеров и ЛИДАРов автономных транспортных средств <i>Слипченко С. О., Шушканов И. В., Подоскин А. А., Крючков В. А., Багаев Т. А., Мармалюк А. А., Ладугин М. А., Пихтин Н. А.</i>	703
МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ	705
Смешанные сегнетоэлектрические кристаллы $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$ <i>Рощупкин Д. В., Фахртдинов Р. Р.</i>	705
Разработка технологии и синтез высокочистого поликристаллического арсенида галлия <i>Мочалов Л. А., Кудряшов М. А., Прохоров И. О., Вишневцев М. А., Слаповская Е. А.</i>	707
Эпитаксиальные пленки ультраширокозонного полупроводника — оксида галлия. Высокочувствительные солнечно-слепые фотодетекторы, газовые сенсоры и диоды Шоттки <i>Николаев В. И., Поляков А. Я., Алмаев А. В.</i>	710
Об анизотропии поверхностной энергии монокристаллов <i>Бокарев В. П., Красников Г. Я.</i>	713
Компоненты радиофотоники в ИФП СО РАН: лазеры, модуляторы, фотоприемники <i>Гилинский А. М., Журавлев К. С., Латышев А. В.</i>	717



Результаты разработки и испытаний полирующих суспензий для процессов химико-механической планаризации в производстве интегральных схем <i>Максютин А. С., Зотов Н. А., Щербаков Н. А., Ранчин С. О., Дубровин А. А., Варламов Д. А., Ранчина Е. Н., Гадалин И. А.</i>	719
Особенности радиационной компенсации широкозонных полупроводников на примере SiC <i>Лебедев А. А., Козловский В. В., Левинштейн М. Е., Давыдовская К. С., Кузьмин Р. А.</i>	723
III-N-гетероструктуры на подложках кремния для СВЧ-транзисторов <i>Цацульников А. Ф., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Заварин Е. Е., Артеев Д. С., Земляков В. Е., Егоркин В. И.</i>	725
Антиотражающие покрытия для AgF- и KtF-фотолитографии <i>Курбатов В. Г., Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Пугачева Т. А., Орган В. М., Комедант Р. И., Малимоненко Н. В., Варламов Д. А., Бадамшина Э. Р.</i>	726
Разработка фоторезистов для фотолитографии с активным излучением 193 и 248 нм <i>Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Курбатов В. Г., Пугачева Т. А., Малимоненко Н. В., Варламов Д. А., Бадамшина Э. Р.</i>	728
Масштабируемые подходы к получению трифенилсульфониевых солей и исследование взаимосвязей их строения со свойствами в полимерной матрице <i>Кузнецов И. Е., Кузнецова Н. А., Сидельцев М. Е., Малимоненко Н. В., Малков Г. В., Бадамшина Э. Р., Аккуратов А. В.</i>	730
Диагностика, литография и метрология функциональных электронных наносистем <i>Щеглов Д. В., Латышев А. В.</i>	733
Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для характеристики низкоразмерных материалов. Обработка сигнала и анализ экспериментальных данных <i>Корепанов В. И.</i>	734
Рентгеновская томография для локального контроля компонент и инспекции модулей <i>Чукалина М. В., Арлазаров В. В., Николаев Д. П., Арлазаров В. Л.</i>	736
Внутренние напряжения и дислокации в полупроводниковых структурах микроэлектроники <i>Романов А. Е.</i>	738
Управление качеством базовых технологий 250, 180, 90 нм: проблемы импортозамещения материалов <i>Панасюк В. Н., Щербаков Н. А., Спиридонов А. В., Варламов Д. А., Королева А. Н.</i>	740
Отработка технологии получения селективного травителя для микроэлектронных производств современного уровня (180 нм) <i>Сеньченко Н. С., Варламов Д. А., Щербаков Н. А., Ранчин С. О.</i>	743

Современные методы полирования пластин из монокристаллического алмаза для изделий микроэлектроники

Кан В. Е., Теплова Т. Б., Худолей А. Л., Артёмов Е. А., Мантузов А. В., Зарезов М. А......746

Удалители полимерной высадки после процессов сухого травления на этапе формирования металлизации при производстве ИС с субмикронными проектными нормами

Кирюшина И. В......748

Многослойный твист-графен для фотодетектирования

Кононенко О. В., Зотов А. В., Князев М. А., Волков В. Т., Матвеев В. Н......751

Перспективы применения наноуглеродных структур в микроэлектронике

Данилова Ю. Н......753

Создание электропроводящих наноинтерфейсов для биоэлектроники

Курилова У. Е., Герасименко А. Ю......756

Требования к порошкам карбида кремния для сублимационного роста монокристаллов 4H-SiC и производства оснастки для микроэлектроники

Федосеев В. Н., Старков А. М., Ефремов Ю. П......758

Карбид кремния для силовой электроники. Оценка российского и международного рынка. От шихты до силовой ячейки.

Производство в России

Жилин А. А......760

ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ.....762

СЕКЦИЯ № 1 «МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ».....762

Анализ конструкции *p*-канального полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Дюканов П. А., Кожухов М. В., Попов Д. А., Грушин А. И., Исмаил-Заде М. Р......762

SPICE-моделирование ВАХ полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом в сверхшироком диапазоне температур

Горбунов К. А., Исмаил-Заде М. Р......765

Моделирование мемристорных структур для формирования элементной базы нового поколения

Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С......768

Применение технологии СБИС на основе на основе ультратонких КНИ-структур для космической и специальной аппаратуры

Лагаев Д. А., Ключников А. С., Шелепин Н. А......770

Исследование особенностей резистивного переключения в мемристорных структурах на основе оксидов переходных металлов

Ганькина Е. А., Резванов А. А., Зюзин С. С., Горнев Е. С......772

Численное моделирование процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения слоев оксидов гафния и циркония <i>Зюзин С. С., Резванов А. А., Зассеев Я. Г., Гвоздев В. А., Ганыкина Е. А., Горнев Е. С.</i>	775
Использование обратно рассеянных электронов для улучшения разрешения Fin-слоя методом моделирования <i>Тихонова Е. Д.</i>	778
Оптимизации шероховатости боковых стенок топологических элементов. Постановка задачи и подходы к решению <i>Шамин Е. С., Шарапов А. А., Скуратов И. Д., Горнев Е. С.</i>	781
Исследование эффектов многофиламентарного переключения в ячейках RRAM на основе HfOx и TiOx <i>Ковешников С. В., Ванькаев А. С., Ключкина Е. В., Федотов М. И.</i>	784
Особенности существующих компактных SPICE-моделей и критерии их достоверности <i>Кириллова А. В., Потупчик А. Г.</i>	786
Эффект локального рассогласования в SPICE-модели транзистора <i>Кривенцев А. М., Осыкин А. А., Нуштаев А. В.</i>	788
Оценка и моделирование основных физических параметров КМОП сенсора <i>Малич Д. С., Ключников А. С., Селецкий В. К.</i>	791
Поведенческая видеоимпульсная модель маломощного усилителя с учетом его нелинейных свойств в области нижних частот <i>Байкалова А. Е., Семенов Э. В.</i>	794
Применения методов машинного обучения для моделирования МОП-транзисторов <i>Жаров Е. Е., Попов Д. А.</i>	797
Об особенностях моделирования печатных антенн методом моментов <i>Торопов В. В.</i>	800
Универсальное средство моделирования широкополосных радиотехнических систем на уровне структурной схемы <i>Полторыхин К. М., Семенов Э. В., Березин А. Е., Байкалова А. Е.</i>	802
СЕКЦИЯ № 2 «ШКОЛА НИИМЭ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЛИТОГРАФИИ, ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И НЕЙРОПОДОБНЫХ СИСТЕМ»	804
Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением <i>Литаврин М. В., Шарапов А. А., Шишлянников А. В., Горнев Е. С.</i>	804
Разработка правил расстановки SRAF на основе модели порога проявления с учетом изменения режимов экспонирования <i>Харченко Е. Л., Московцев А. Ф.</i>	807

Разработка методики проектирования универсального фотошаблона калибровочных тестовых структур <i>Уткина А. А., Харченко Е. Л.</i>	809
Применение алгоритмов машинного обучения для детектирования дефектов на SEM-изображениях <i>Московцев А. Ф., Харченко Е. Л.</i>	811
Исследование применимости параметра ядра плотности при подборе оптимальной формы компактной модели ФРМ <i>Степанова М. Г., Харченко Е. Л.</i>	814
Платформа для взаимодействия с заказчиком и автоматизации внутренних процессов предприятия <i>Медведев К. А., Иванов В. В., Жаворонкин Ю. Г., Рябинин А. Д.</i>	816
Программная система предиктивного анализа востребованности научных публикаций <i>Капкин И. Д., Рябинин А. Д.</i>	819
Нейропластичность нанокристаллических пленок LiNbO_3 для синаптических устройств <i>Хахулин Д. А., Вакулов З. Е., Дзюба Д. А., Смирнов В. А.</i>	821
Компонентная база для сетей LSTM на основе мемристивных кроссбаров <i>Кипелкин И. М., Громов Н. В., Леванова Т. А., Герасимова С. А.</i>	823
Мемристивные свойства конденсаторных структур на основе оксида гафния <i>Швецов Б. С., Мартышов М. Н., Жигунов Д. М.</i>	825
Описание на Systemverilog вычислительного блока нейроморфного ядра <i>Исламгулова Х. И., Теплов Г. С.</i>	827
Реализация цифровых двойников для мощных МОП-транзисторов с помощью ПО Python <i>Зубкова А. И., Харитонов И. А.</i>	830
Аппаратно-программный комплекс ИИ на основе отечественных процессоров <i>Рожин А. К., Бабинцев Л. В., Нефедов С. И., Соловьев Д. В.</i>	833
Исследование и автоматизация процесса классификации по причинам отказа ЭКБ методами машинного обучения <i>Чернова А. С., Жевненко Д. А., Мещанинов Ф. П., Тельминов О. А.</i>	834
СЕКЦИЯ № 3 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ И УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»	836
Принципы построения фотонного генератора истинно случайных чисел <i>Пузатых И. П., Сапегин А. А., Барабаненков М. Ю.</i>	836
Адаптация DRC и LVS правил для техпроцессов «тоньше» 110 нм под работу с открытыми инструментами <i>Елизаров С. Г., Лукьянченко Г. А., Уманский М. В., Черных Е. А.</i>	838



Разработка модели НЕМТ на основе гетероэпитаксиальной структуры AlN/GaN для проектирования отечественных гетероструктурных СВЧ МИС <i>Рыжук Р. В., Неволлина Т. Н., Каргин Н. И., Гусев А. С., Цунваза Д. М.</i>	840
Формирование базы знаний для расширенного параметрического синтеза изделий микроэлектроники <i>Колдаев И. М., Жаворонкин Ю. Г., Орлов В. О.</i>	843
Особенности современных подходов к верификации RISC-V ядер <i>Чусов С. А.</i>	845
Современные методы тестирования ПЛИС <i>Горчакова М. А.</i>	847
Быстродействующий ступенчатый аналого-цифровой преобразователь с цифровой коррекцией <i>Кочетков Д. В., Паташев П. А., Белоусов Е. О., Эннс А. В., Максимов А. К., Моленкамп К. М.</i>	850
Разработка симулятора перспективного отечественного криптографического микроконтроллера на базе архитектуры RISC-V <i>Гусаров А. А., Буканов Е. А.</i>	853
Интеграция A ³ B ⁵ кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа <i>Ефимов А. С., Рудина А. Д., Воронин А. А., Темнов А. М., Дудинов К. В., Груша А. В., Курочка А. С.</i>	855
Разработка настраиваемого широкополосного СМЛ передатчика для использования в устройстве сериализации/десериализации данных <i>Паташев П. А., Белоусов Е. О., Кочетков Д. В., Эннс А. В., Максимов А. К., Моленкамп К. М.</i>	858
Разработка интегрального КМОП 180 нм приемника гидроакустических сигналов <i>Вертегел В. В., Ветров И. Л., Манько А. С., Зеленкевич Д. Ю., Смаилов С. Ф., Кожемякин В. С.</i>	861
Маршрут процесса верификации при проектировании современных технологических библиотек <i>Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.</i>	863
Построение системы управления лучом фазированной антенной решетки на основе ПЛИС <i>Русов Ю. С., Руссо Д. Р., Куренков П. П.</i>	866
СЕКЦИЯ № 4 «ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»	868
Совместная диффузия фосфора и галлия в германии <i>Кобелева С. П., Юрчук С. Ю.</i>	868
Технологии создания тренчевых интегральных конденсаторов с высокой емкостью <i>Мяконьких А. В.</i>	870

Синтез методом CVD и исследование монокристаллов алмаза для микроэлектроники	
<i>Балинов Д. А., Кан В. Е., Кириченко А. Н., Родионов Н. Б.</i>	873
Эффект заместителей катиона трифенилсульфониевых солей на их физико-химические свойства в составе композиции фоторезиста	
<i>Сидельцев М. Е., Кузнецова Н. А., Малимоненко Н. В., Кузнецов И. Е., Малков Г. В., Бадашнина Э. Р., Аккуратов А. В.</i>	875
Расчетно-экспериментальный метод учета влияния формы импульса при испытаниях изделий ЭКБ	
<i>Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Земцов А. Э.</i>	878
Особенности формирования несплавных омических контактов для GaN МИС СВЧ	
<i>Рогачёв И. А., Добров А. В., Красник В. А., Дудинов К. В., Цацульников А. Ф., Егоркин В. И.</i>	881
Исследование факторов возникновения неровности наноструктур и ее влияния на характеристики приборов	
<i>Шарапов А. А., Горнев Е. С.</i>	884
Низкотемпературное радикальное ISSG окисление кремния	
<i>Горохов С. А., Черняев М. В., Патюков С. И., Резванов А. А.</i>	886
Сухая аэрозольная печать для изготовления плазмонных наноструктур	
<i>Каменова Е. И., Лизунова А. А., Филалова Э. М., Мусаев А. Г., Корнюшин Д. В., Мало Д., Иванов В. В.</i>	889
Измерительно-аналитический комплекс для комплексной диагностики полупроводниковых микро- и наноструктур	
<i>Трусов Е. П., Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.</i>	891
Исследование технологического процесса взаимной диффузии алюминиевого проводника и полупроводниковой подложки	
<i>Назмиев А. И.</i>	893
Возможности атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления с источником индуктивно-связанной плазмы	
<i>Кузьменко В. О., Мьяконьких А. В., Руденко К. В.</i>	894
Элемент хранения сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти: структура и свойства	
<i>Резник А. А., Резванов А. А., Зюзин С. С., Нелюбин И. В., Поляков С. Н.</i>	897
Гибридные low-k: оценка диэлектрической проницаемости, пористости и механических свойств	
<i>Цепкин М. В., Резванов А. А.</i>	902
Исследование нанесения углеродных паст на каркасы из углеволокна для электродов суперконденсаторов	
<i>Жукова Д. Н., Морозов М. В.</i>	904



Изменение фоточувствительности поликристаллических пленок PbTe и PbS в кислородосодержащей атмосфере <i>Отажонов С. М., Ботиров К. А., Алимов Н. Э., Халилов М. М.</i>	906
Улучшения характеристики фотоэлементов на основе р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe при термоциклировании <i>Отажонов С. М., Эргашев Р.</i>	908
СЕКЦИЯ № 5 «ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОПТИКЕ И ФОТНИКЕ»	910
Особенности построения фотонных ИС тензорного сопроцессора для ускоренных нейроморфных вычислений <i>Сапегин А. А., Марахин А. А., Макаров М. Э., Миннуллин Р. Т.</i>	910
Полное отражение электромагнитной волны от одномерного фотонного кристалла в структуре кремний на изоляторе <i>Миннуллин Р. Т., Барабаненков М. Ю.</i>	913
Лазерная активация генерации второй гармоники нитевидных нанокристаллов кремния в гибкой мембране <i>Масталиева В. А., Неплох В. В., Айбуш А. В., Фёдоров В. В., Якубова А. А., Гудовских А. С., Макаров С. В., Мухин И. С.</i>	916
Учет расходимости сфокусированного лазерного пучка при оценке параметров чувствительности к одиночным радиационным эффектам <i>Шарапов А. А., Ватуев А. С., Емельянов В. В.</i>	918
Высокоразрешающие волоконно-оптические элементы для техники ночного видения последнего поколения <i>Кастуев М. К., Гусалов А. И.</i>	921
Использование гребневых волноводов для уменьшения неравномерности потерь мультиплектора на основе массива волноводов <i>Бабичек И. В., Сапегин А. А.</i>	922
Исследование дисперсий нанотрубок на нелинейно-оптические свойства для ограничения ИК излучения ближнего диапазона и защиты светочувствительных сенсоров и органов зрения <i>Гончарова А. В., Василевский П. Н.</i>	925
Особенности конструкции оптических разветвителя и их влияние на выходные параметры <i>Крылов А. А., Скуратов И. Д., Светиков В. В.</i>	927
Исследование и анализ нелинейно-оптических эффектов в кремниевых шелевых волноводных структурах <i>Мурзагалина С. М., Скуратов И. Д.</i>	930
Исследование фазового сдвига в волноводах с халькогенидными стеклами <i>Митрофанова А. Е.</i>	934

Нелинейно-оптическая диагностика и управление нетривиальными состояниями намагниченности в доменной структуре тонких магнитных пленок

Степанов М. А., Гуськов А. А., Митетело Н. В., Пятаков А. П., Мишина Е. Д...... 936

СЕКЦИЯ № 6 «ЭФФЕКТЫ В СПИНТРОНИКЕ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ»..... 938

Управление нелинейным сдвигом частоты прецессии намагниченности спинтронного осциллятора при помощи внешнего магнитного поля

Матвеев А. А., Сафин А. Р., Никитов С. А...... 938

Использование метода высокоэнергетической рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с возбуждением в режиме стоячих волн для исследования устройств наноэлектроники

Сизых Н. А., Зенкевич А. В...... 941

Синтез и исследование низкоразмерных структур для фотодетекторов ИК-диапазона

Рымжина А. Р., Павельев В. С., Трупати Н...... 943

Принципиальный подход к развитию 3D-НАНОЭЛЕКТРОНИКИ на основе оптических внутриаппаратных интерфейсов и радиальных цилиндрических структур

Одинцов В. Л...... 945

Влияние температуры на статистические характеристики и параметры мощных МОП-транзисторов

Хлынов П. А., Самбурский Л. М...... 947

Применение ферромагнитных материалов для обеспечения работоспособности RFID-меток при контакте с металлическими объектами

Эпов И. В...... 951

Явление сегрегации примесных атомов в эпитаксиальных структурах кремния

Дубкова А. С...... 953

Влияние поверхностной энергии на анизотропию работы выхода на разных гранях кристаллов I и II групп химической таблицы Д. И. Менделеева

Быковский К. С...... 955

Сверхбыстрая динамика намагниченности спинтронного излучателя на основе структуры Co/IgMn

Авдеев П. Ю., Лебедева Е. Д., Горбатова А. В., Буряков А. М...... 958

Исследование влияния пористости на свойства пленок ЦТС и их применимость в устройствах микроэлектроники

Жемеров Е. И., Буряков А. М., Вортилов К. А., Серегин Д. С., Мишина Е. Д...... 960

Методы плавной перестройки амплитуды и поляризации ТГц сигнала в структурах, содержащих слои нематика и графена

Дубинецкий Н. Н., Поддубская О. Г., Волюнец Н. И., Батраков К. Г...... 962

Физические эффекты в спинтронных ТГц генераторах на основе Co/W в зависимости от толщины ферромагнитного слоя <i>Лаптева М. С., Авдеев П. Ю., Лебедева Е. Д., Буряков А. М., Климов А. А., Мишина Е. Д.</i>	964
Механизмы генерации ТГц-излучения в спинтронных генераторах на основе IгMn и Co <i>Лебедева Е. Д., Авдеев П. Ю., Горбатова А. В., Буряков А. М.</i>	966
Электромагнитные характеристики полуволновых сверхпроводящих 325 МГц резонаторов <i>Сухоцкий А. Е., Быченко Д. С., Гурневич Е. А., Волюнец Г. И., Гусев С. С., Максименко С. А.</i>	968

УДК 004.3

Основные тренды в микроэлектронике для поддержки искусственного интеллекта**Белоусов С. А.***ПАО «Сбербанк России»**117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19*

Рассмотрены основные тренды развития аппаратных средств, применимых для задач искусственного интеллекта. Обозначены существующие ограничения и способы их преодоления.

Ключевые слова: искусственный интеллект; НВМ; CXL.

Развитие искусственного интеллекта является ключевым драйвером для создания специализированных устройств с применением новых подходов к организации обмена данными между отдельными вычислительными блоками, типом используемых модулей памяти и доступом к ней, отходом от традиционной фоннеймановской архитектуры, применением новых процессорных архитектур, а также для развития экосистемы программного обеспечения в целях поддержки и бесшовной интеграции различных типов устройств в перспективных гетерогенных вычислительных кластерах.

В докладе рассмотрены основные тренды в разработке современных вычислительных устройств для задач ИИ. В частности, обозначена проблема memory wall, связанная с большим числом коэффициентов в современных нейронных сетях, пути ее преодоления за счет использования памяти с высокой пропускной способностью (НВМ) и расположение вычислительного блока в непосредственной близости к ней на едином кристалле-интерпозере. Кроме того, обозначены основные тенденции по развитию высокоскоростного межсоединения в вычислительных кластерах, ограничения которого оказывают существенное влияние на быстродействие системы при проведении процедуры обучения. К таким тенденциям относят современные решения на базе PCIe с функцией когерентности (CXL), а также все более частое использование оптического интерконнекта в вычислительных кластерах.

Автор считает, что новым в работе является комплексный аналитический обзор по существующим трендам в области разработки аппаратного обеспечения для приложений искусственного интеллекта.

УДК 004.383.8.032.26

Многоуровневые мемристивные структуры для когнитивных вычислений

Андреева Н. В., Мазинг Д. С., Петров М. О., Рындин Е. А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com

Рассматриваются механизмы перестройки сопротивления многоуровневых мемристоров и основные факторы, определяющие разброс их характеристик. Показывается возможность плавной перестройки сопротивления за счет электронных и ионных процессов. Оценивается влияние рабочих параметров мемристоров на эффективность нейрочипов.

Ключевые слова: аналоговые нейроморфные архитектуры; многоуровневые мемристивные структуры; энергоэффективность.

Ожидаемый выигрыш в энергопотреблении и производительности при аппаратной реализации нейроморфных вычислений и вычислений в памяти достигается за счет использования в архитектуре нейрочипов кроссбар-массивов с ячейками энергонезависимой памяти. Как в режиме инференса, так и в режиме обучения нейронных сетей, основной исполняемой операцией является матрично-векторное перемножение которое при реализации в аналоговом режиме с использованием кроссбар-архитектур позволяет существенно распараллеливать процесс обработки информации и эффективно обойти проблему бутылочного горлышка архитектуры фон Неймана.

В настоящий момент одной из основных проблем на пути к успешной аппаратной реализации архитектур нейронных сетей является «незрелость» технологии кроссбар-массивов с ячейками энергонезависимой памяти, что ограничивает максимальный размер массива, а также точность аппаратной подстройки весов в процессе обучения. Таким образом, достижима на сегодняшний день энергоэффективность ИНС-чипов на базе кроссбар-архитектур в режиме инференса варьируется в диапазоне от 100 до 250 Топ/Дж и сравнима с энергоэффективностью их реализации в рамках традиционной КМОП-технологии, которая находится на уровне 200 Топ/Дж. При этом до сих пор не было продемонстрировано эффективной реализации режима обучения «на чипе».

Результаты анализа специфики градиентной перестройки сопротивления в новых типах энергонезависимой памяти свидетельствуют о том, что использование в структуре кроссбар-массивов многоуровневых мемристивных структур наиболее оптимальным способом позволяет организовать аналоговое исполнение операций матрично-векторного перемножения. Их интеграция в кроссбар-массивы осуществляется в BEOL-процессе КМОП-технологии, а полностью аналоговая архитектура ИНС-чипов позволяет отказаться от использования селективного устройства. Вектор данной области исследований сосредоточен на улучшении характеристик существующих видов многоуровневых мемристивных структур. При этом традиционным подходом к организации градиентной перестройки сопротивления является разработка мемристивных композиций на базе тонкопленочных металлооксидных слоев. В качестве основной рабочей гипотезы, объясняющей эффекты

резистивной перестройки в таких структурах, выступает предположение об изменении концентрации кислородных вакансий и их перераспределении в асимметричной мемристивной композиции под действием приложенного внешнего напряжения вследствие увеличения ионной подвижности. Таким образом, физический механизм перестройки сопротивления определяет естественное ограничение на практическое использование «традиционных» мемристивных структур, обусловленное характером изменения ионной подвижности в электрическом поле, а также ее величиной в отсутствие поля. Разработанные к настоящему времени способы улучшения характеристик рассматриваемых структур не позволили преодолеть барьер на уровне 10^5 циклов переключения сопротивления при приемлемой с практической точки зрения вариабельности рабочих параметров.

В качестве альтернативы традиционному подходу мы рассматриваем варианты организации градиентной перестройки сопротивления в тонкопленочных структурах, определяемой преимущественно электронными процессами. Предполагается, что изменение физического механизма резистивной перестройки позволит существенно улучшить характеристики многоуровневых мемристивных структур.

Перенос программных алгоритмов нейронных сетей на аппаратную часть без учета физических характеристик элементов кроссбар-массивов приводит не только к снижению точности решаемых задач в режиме инференса, но и к потере универсальности аппаратного дизайна нейрочипа. На примере архитектуры ResNet мы показали, что учет влияния характеристик мемристивных структур при проектировании позволяет оптимизировать аналоговые архитектуры нейронных сетей, существенно повысив их производительность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013

УДК 004.9 + 004.4

Нейроморфные вычислительные системы на основе КМОП-интегрированных мемристорных матриц: современное состояние и перспективы развития

Щаников С. А.

ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Данный доклад посвящен вопросам создания высокопроизводительных вычислительных средств для решения задач в области искусственного интеллекта. В частности, рассмотрен перспективный подход, при котором основная часть вычислений в нейропроцессоре выполняется в аналоговом виде с применением матриц мемристивных устройств RRAM.

Ключевые слова: искусственный интеллект; мемристивные устройства; нейроморфные вычисления; нейронные сети; нейропроцессор.

В докладе представлены обзор и анализ современного состояния и перспектив развития высокопроизводительных вычислительных систем на основе массивов мемристивных устройств, использующих для выполнения векторно-матричного умножения архитектуру «кроссбар», в которой мемристоры на пересечениях проводящих шин выступают в качестве синаптических весов — пластичных соединений между искусственными нейронами в полносвязной архитектуре нейронных сетей.

Приведены результаты анализа производительности и энергоэффективности уже созданных прототипов таких нейроморфных систем, которые показывают их существенное преимущество (на несколько порядков) по этим параметрам над известными нейропроцессорами на основе традиционной элементной базы [1]. Рассмотрены общие подходы к разработке и созданию: новой элементной базы на основе КМОП-интегрированной технологии RRAM; мемристорного нейропроцессора, использующего мемристорные матрицы кроссбар, в качестве вычислительных ядер и масштабируемые многоядерные архитектуры для реализации как формальных, так и импульсных нейросетевых алгоритмов.

Технологическое освоение новой элементной базы и создание мемристорных нейроморфных вычислительных систем не только обеспечит своевременную диверсификацию аппаратного обеспечения для непрерывного развития и массового внедрения технологий искусственного интеллекта, но и позволит решить задачи совершенно нового уровня по созданию гибридного интеллекта на основе симбиоза искусственных и биологических нейронных сетей [2–4].

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 9.1 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»)

Литература

1. Mikhaylov A. et al. Neuromorphic Computing Based on CMOS-Integrated Memristive Arrays: Current State and Perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023.

2. Makarov V.A. et al. Toward reflective spiking neural networks exploiting memristive devices // *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2022. Vol. 16. P. 859874.
3. Shchanikov S. et al. Designing a bidirectional, adaptive neural interface incorporating machine learning capabilities and memristor-enhanced hardware // *Chaos, solitons & fractals*, 2021. Vol. 142. P. 110504.
4. Mikhaylov A. et al. Neurohybrid memristive CMOS-integrated systems for biosensors and neuroprosthetics // *Frontiers in neuroscience*, 2020. Vol. 14. P. 358.

УДК 621.382.2/3

Исследование радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения

Кульченков Е. А.¹, Рыбалка С. Б.¹, Демидов А. А.^{1,2}¹ *Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7
demandr@yandex.ru*² *АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»
241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103*

Выполнена экспериментальная оценка влияния электрических режимов работы линейного стабилизатора напряжения положительной полярности 1395ЕН08И на дозовую радиационную стойкость с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения; радиационная стойкость.

Введение

Исследование и обеспечение радиационной стойкости интегральных микросхем линейных стабилизаторов напряжения к накопленной дозе в процессе разработки и производства является актуальной задачей для обеспечения развития таких отраслей как космонавтика, авиастроение, ядерная энергетика [1, 2].

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследований выступал линейный стабилизатор напряжения 1395ЕН08И с номинальным $U_{\text{вых}} = 9$ В производства АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ». Исследование проводилось с помощью разработанного комплекса в составе: рентгеновский комплекс РИК-0401, плата контактного устройства, блок управления РИК-0401, комплекс измерительной аппаратуры, компаратор рентгеновского излучения ДРИ-0401, плата коммутации и программное обеспечение, разработанное в среде LabView.

Были исследованы две группы образцов при разных электрических режимах работы (см. рис. 1). Образцы 1, 2, 3 облучались в режиме максимального тока нагрузки $I_n = 1$ А при $U_{\text{вх}} = 9,5$ В. Образцы 4, 5, 6 облучались в режиме максимального входного напряжения $U_{\text{вх}} = 24$ В при $I_n = 10$ мА. Установлено, что при $I_n = 1$ А и $U_{\text{вх}} = 9,5$ В выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ стабилизатора снижается до уровня работоспособности 8,19 В при уровне поглощенной дозы $D \approx 345 \cdot 10^3$ ед. (ед. — единицы компаратора рентгеновского излучения ДРИ-0401).

При снижении I_n до 10 мА и увеличении $U_{\text{вх}}$ до 24 В, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ снижается до уровня работоспособности при $540 \cdot 10^3$ ед. Таким образом, увеличение I_n приводит к уменьшению радиационной стойкости стабилизатора примерно на 36%. При наиболее жестком электрическом режиме ($I_n = 1$ А, $U_{\text{вх}} = 9,5$ В) были проанализированы семь основных параметров линейного стабилизатора и определены наиболее чувствительные параметры к поглощенной дозе — минимальное падение напряжения $U_{\text{ПДmin}}$ и ток потребления $I_{\text{пот}}$.

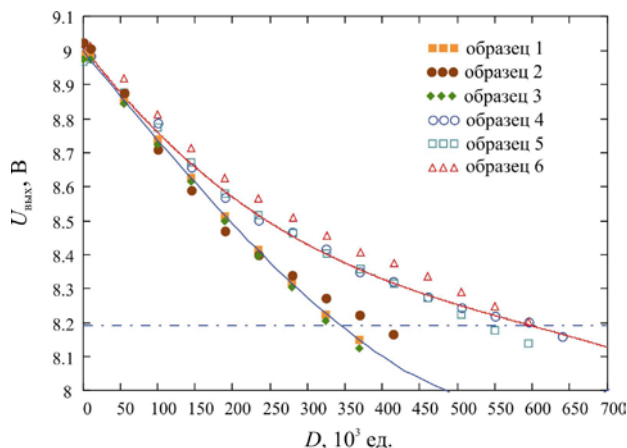


Рис. 1. Зависимости $U_{\text{вых}}$ от уровня поглощенной дозы D при $I_{\text{н}} = 1$ А и $U_{\text{вх}} = 9,5$ В (образцы 1, 2, 3) и $U_{\text{вх}} = 24$ В и $I_{\text{н}} = 10$ мА (образцы 4, 5, 6). Штрихпунктирная линия — уровень работоспособности стабилизатора 1395ЕН08И

Заключение

Установлено, что наиболее чувствительными параметрами стабилизатора 1395ЕН08И к эффектам поглощенной дозы являются выходное напряжение, минимальное падения напряжения и ток потребления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замещение импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение от 9.02.2023 г. № 075-11-2023-008) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ

Литература

1. Gaul S. J., Vonno N., Voldman S. H., Morris W. H. Integrated Circuit Design for Radiation Environments. Wiley & Sons, 2019. 392 p.
2. Velazco R., McMorrow D., Estela J. Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications. Springer Cham, 2019. 401 p.

УДК 621.3.049

Развертывание локальной системы навигации в условиях подавления сигналов ГНСС. Моделирование работы системы в различных конфигурациях

Корнеев И. Л., к. т. н., Прасолов В. Ф.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

i.korneev@i-progress.tech, v.prasolov@i-progress.tech

Приведена структура локальной системы навигации и примеры развертывания системы на местности при различных значениях геометрического фактора. Разработана программа моделирования работы системы.

Ключевые слова: локальная система навигации; геометрический фактор; псевдослучайная последовательность; позиционирование.

Проанализированы достоинства и недостатки существующих систем ГНСС и локальных систем навигации:

- **глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС)** имеют недостаточную помехоустойчивость;
- **инерциальные навигационные системы (ИНС)** не подвержены воздействию радиопомех и переотраженных сигналов, но в случае автономной работы имеют свойство накапливать ошибку позиционирования во времени;
- **локальные системы навигации (ЛСН)** дополняют системы ГНСС в случаях невозможности использования последних из-за мощных поставленных помех или отсутствия сигнала ГНСС в точке приема. Но в автономном режиме ЛСН не обеспечивают заданную точность позиционирования движущихся объектов из-за низкой частоты обновления данных. Поэтому производится комплексирование ЛСН с ИНС;
- **баровысотомер** обеспечивает точное измерение высоты объекта над Землей. Так как вышки локальных систем находятся близко к поверхности Земли, геометрический фактор при измерении высоты неудовлетворительный. Поэтому используется комплексирование ЛСН с баровысотомером. Локальная система навигации состоит из сети радионавигационных опорных станций (РОС1-РОС4), абонентских терминалов (АТ1), как показано на рис. 1.

На рисунке отражен пример использования разработанной программы симуляции ЛСН – SimLSN.

В системе реализован как **запросный**, так и **беззапросный** режимы позиционирования.

В беззапросном режиме используется разностно-дальномерный метод, который предполагает наличие как минимум трех опорных станций для получения линий положений в виде гипербол с фокусами в опорных пунктах. Эти линии строятся как геометрические места точек с постоянной разностью расстояний: $R_2 - R_1 = \text{const}$, $R_3 - R_1 = \text{const}$, $R_4 - R_1 = \text{const}$ (по часовой стрелке). Точки пересечения гипербол совпадают с местоположением абонентского терминала АТ1, как показано на рис. 1.

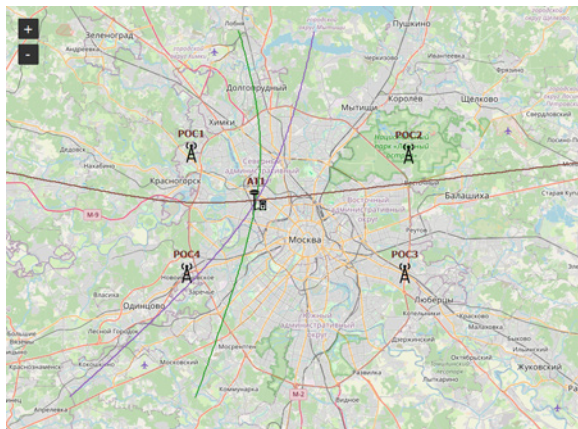


Рис. 1. Развертывание сети из трех РОС и АТ с тремя нанесенными гиперболами

В разностно-дальномерном методе позиционирования необходима синхронизация опорных станций, при которой ведущая РОС4 посылает синхросигнал на остальные ведомые станции. Используется тот факт, что известны точные расстояния между РОС.

Приводится оценочный расчет инструментальной ошибки измерения псевдодальности при дискретизации входного сигнала в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) приемника.

Получаем оценку инструментальной ошибки измерения псевдодальности в ЛСН:

$$\text{синстр} = \frac{c}{f_{\text{симв.}} \cdot K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4 \cdot K5} = \frac{2,997 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 4} = 0,03 \text{ м},$$

где $K1 = 20$, $K2 = 10$ определяют повышение точности за счет повышения частоты дискретизации сигнала, $K3 = 3$ определяет повышение точности за счет точного определения положения пика функции корреляции, $K4 = 5$, $K5 = 4$ определяют повышение точности за счет увеличения числа измерений.

Вычисление геометрических факторов

Концепция геометрического фактора или снижения точности (DOP) заключается в том, чтобы определить, как ошибки в измерении повлияют на окончательную ошибку позиционирования с учетом геометрии:

$$\sigma_{\text{п}} = \text{синстр} \cdot \text{DOP}.$$

Антенны РОС подняты на высоту $h2 = 30$ м. Радиовидимость для пары РОС—РОС D = 45 км

На рис. 2 видно, что HDOP (на плоскости) составляет 0,89, то есть инструментальная ошибка уменьшается при увеличении количества опорных станций.

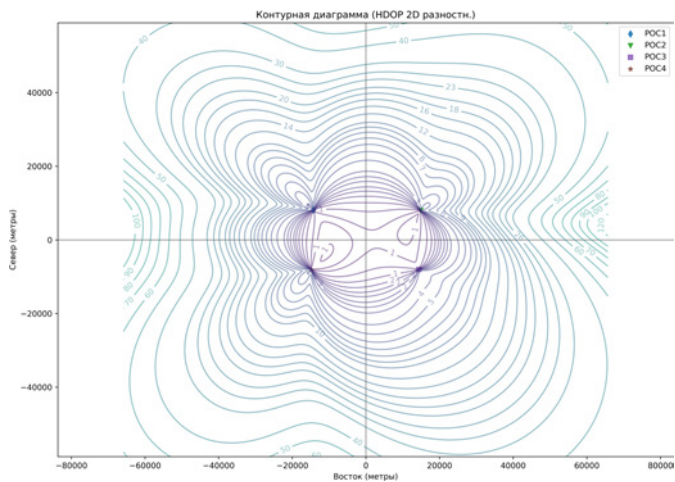


Рис. 2. Значения геометрического фактора HDOP для сети РОС

УДК 004.23

Использование архитектуры RISC-V для проектирования микросхем в целях использования в системах передачи информации

Игошин А. В., Лебедев А. В., к. т. н., Степанова А. С.*ООО «НМ-Тех»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,**этаж 1, помещение XII, офис 4,4а**info@nm-tech.org*

Показаны основные недостатки применения микропроцессорных ядер на основе архитектуры ARM и MIPS. Рассмотрено альтернативное решение применения микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V. Показана актуальность применения отечественных микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V.

Ключевые слова: микропроцессорное ядро; архитектура RISC-V; микросхемы критической инфраструктуры.

Текущая мировая ситуация критически повлияла на все сферы производства изделий микроэлектроники, в частности для решений, используемых в системах для передачи информации, таких как сим-карты, умные счетчики электроэнергии, умные газовые счетчики, радиостанции и т.д. Ранее в этих изделиях использовались микросхемы зарубежных компаний (NXP, GeAlto и т.д.). «Сердцем» этих микросхем являются микропроцессорные ядра, основанные на архитектурах ARM и MIPS от компании ARM.

Применяя решения ARM в микросхемах критической инфраструктуры (КИ), к каким относятся системы передачи информации, нельзя быть уверенным в отсутствии недокументированных возможностей и защите от несанкционированного доступа к этим микросхемам или микропроцессорным ядрам извне.

Альтернативным решением для применения в составе микросхем КИ является использование микропроцессорных ядер на основе архитектуры RISC-V [1]. При этом решения, основанные на данных ядрах, как и сами микропроцессорные ядра для применения в объектах КИ, необходимо сертифицировать согласно требованиям ФСТЭК России.

Актуальной является проблема не только разработки и применимости микропроцессорных ядер [2], но и их отладки на отечественных микроэлектронных производствах по различным технологиям с учетом технологических опций.

Другим немаловажным фактором использования отечественных микропроцессорных ядер является переработка программного обеспечения [3], ранее используемого в решениях на основе микропроцессорных ядер ARM, которое также должно быть верифицировано на технологиях отечественных микроэлектронных производств.

При использовании данного подхода с заказчиков снимаются вопросы, связанные с квалификацией и аттестацией микропроцессорных ядер на технологических процессах отечественных микроэлектронных производств, а также вопросы, связанные с аттестацией данных микропроцессорных ядер по требованиям

ФСТЭК России, что ведет к импортозамещению и ускоряет выход на рынок новых продуктов.

Литература

1. ARM vs RISC-V // Tech Journeyman, электрон. научн. журн. — URL: <https://tech-journeyman.com/blog/arm-vs-risc-v>.
2. Крутчинский С.Г. Современная микросхемотехника и конкурентоспособность отечественных аналоговых ИС и смешанных СФ-блоков // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2008). — Москва. — 550 с.
3. RISC-V, Spike, and the Rocket Core, Ben Keller // CS250 Lab Assignment 2 (Version 091713), 2013, 23 p.

УДК 627.712.63

Линейка телематических модулей: достижения и перспективы развития

Чикваркин И. Б., Потапов И. В., Скворцов В. О., к. т. н. Прасолов А. А.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

Приведено описание телематических навигационно-связных модулей и перспективных телематических модулей. Приведены варианты применения комбинации модулей сотовой связи GSM и навигационных модулей. Рассмотрены возможности передачи информации через сотовую связь на серверы мониторинга. Рассмотрены перспективы проектирования высокоточных модулей.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС); модули связи GSM; модули навигации; модули высокоточной навигации; терминал «ЭРА-ГЛОНАСС»; аппаратура спутниковой навигации.

В докладе обозначена проблема разработки линейки перспективных навигационно-связных модулей GSM, таких как «Модуль 2G» (два варианта исполнения), «Модуль 4G» (три варианта исполнения), «Модуль BT 5.0», «Модуль Wi-Fi+BT», «Модуль 2G+GNSS+BT» (три варианта исполнения), «Модуль 4G+GNSS» (семь вариантов исполнения). Доложено текущее состояние разработки по каждому модулю. Озвучена проблематика проектирования и изготовления опытных образцов. Указаны потребности по модулям в виде сводного анализа.

Представлены перспективные модули «Модуль 2G+NB IoT», «Модуль 4G+GNSS+T», «Модуль BT 5.2», «Модуль Wi-Fi 5/6», «Модуль GNSS», «Модуль BT GNSS»:

- навигационный модуль;
- модуль приема-передающий GSM;
- модуль связи Wi-Fi (новых поколений);
- модуль связи Bluetooth.

В каждом модуле находятся чипы, которые позволяют в полной мере перекрыть потребности рынка, т.е. охватить различные ниши от автопрома (трекеры, терминалы «ЭРА-ГЛОНАСС», модули связи и навигации бортовых устройств) до сельского хозяйства и привычных для многих кассовых терминалов [1], счетчиков электроэнергии и воды.

Кроме навигационного приемника в комбинированных модулях находится очень важная позиция — связанной модем GSM [2]. Покрытие сети GSM очень важно для корректной работы устройства. Наличие сотовой сети второго поколения позволяет пользователям получить большую зону охвата. Применение связанного модема 4G позволяет расширить пропускной канал по передаче данных.

Приемо-передающие модули стандартов Wi-Fi и BT позволяют не только передавать данные между пользователями, но и помогать ориентироваться в пространстве без помощи сигналов ГНСС (indoog-навигация).

Модули высокоточной навигации (BT GNSS) позволяют проектировать навигационную высокоточную аппаратуру потребителя для разных отраслей (сельское хозяйство, строительство, телекоммуникации и другие).

Таким образом, навигационные, связные и навигационно-связные модули могут применяться во всех направлениях, где возникает потребность определения местоположения и передачи данных.

Литература

1. Чикваркин И. Б., Потапов И. В., Андреев Р. А., Прасолов А. А. Линейка перспективных навигационно-связных модулей GSM // 8-я Международная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». Сборник тезисов. — Алушта, октябрь 2022 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА.
2. Корнеев И. Л., Чикваркин И. Б., Кузнецов А. С., Егоров В. В., Дубинко Т. Ю. Отечественные навигационно-связные модули: разработка нового поколения на основе отечественной ЭКБ // 5-я Международная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». Сборник тезисов. — Алушта, октябрь 2019 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА.

УДК 621.3.049

Технологический суверенитет в сфере навигационного обеспечения

Скиба Е. С.*АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54**e.skiba@i-progress.tech*

Рассмотрены проблематика применения иностранной электронной компонентной базы в отечественной аппаратуре, риски применения иностранной ЭКБ в КИИ.

Ключевые слова: отечественные навигационные приемники; иностранная ЭКБ в КИИ; отечественное программное обеспечение.

В последние годы мы столкнулись с рядом вызовов техногенного, социокультурного и экономического характера. Ранее подобные события случались, но происходили последовательно. Теперь они одновременно затронули все сферы жизнедеятельности человека, взаимно усилив негативное воздействие.

Преодоление насушных проблем вызвало необходимость задействования максимального количества ресурсов (человеческих, технологических, финансовых и пр.) без возможности их концентрации на решении какой-либо одной глобальной задачи.

Одной из точек опоры и роста по преодолению глобальных негативных явлений становится индустрия спутниковой навигации, которая не только относится непосредственно к транспортной навигации, но через решение геодезических задач и задач временной синхронизации охватывает практически все научно-производственные отрасли России.

Основой роста в текущее время является обеспечение технологического суверенитета. Сложно переоценить важность этого, просто взглянув на то, какие сферы экономики напрямую зависят от спутниковой навигационной и геодезической аппаратуры и программного обеспечения. Потребителями системы спутниковой навигации являются важнейшие отрасли нашей страны.

Риски отключения от навигационных данных сложно переоценить.

На сегодняшний день из России ушел ряд производителей геодезической аппаратуры и программного обеспечения, в связи с этим возникают потребности, удовлетворение которых может обеспечить технологический суверенитет РФ в сфере высокоточной навигации и геодезии.

В данном докладе акцент смещен на геодезию, но схожие проблемы есть и в других задачах из сферы навигации.

Большинство навигационных приемников не способно работать в отсутствие GPS-сигналов, соответственно, может пропасть синхронизация времени, и тогда у нас по всей стране пропадет GSM-связь, перестанут работать мобильные телефоны.

Если перестанут работать геодезические сети референсных станций, сильно увеличатся сроки строительства.

Прекратят работать нижний сегмент ГЛОНАСС — начнет деградировать точность определения местоположения по ГЛОНАСС.

Обеспечив технологический суверенитет в сфере навигации, мы снимем ряд рисков внешних воздействий, и это позволит нашей инфраструктуре функционировать в любых условиях.



УДК 621.382.2/.3, ББК 32.853

Особенности проектирования КМОП nano-СБИС объемного кремния с повышенной дозовой стойкостью

Герасимов Ю. М., к. т. н., с. н. с.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

ymger29@mail.ru

Получила дальнейшее развитие методология радиационно стойкого проектирования КМОП СБИС по технологиям объемного кремния уровня 250–90 нм в части повышения их дозовой стойкости. Даны рекомендации по выбору технических решений, технологических опций и электрических режимов работы элементов, позволяющих ослабить влияние радиационного облучения на параметры СБИС.

Ключевые слова: КМОП СБИС; МОП-транзистор (МОПТ); объемный кремний (ОК); СФ-блок; система на кристалле (СнК); ток утечки; дозовая стойкость; радиационно стойкое проектирование (РСП).

Введение

КМОП СБИС ОК уровня 250–90 нм (далее nano-СБИС) перспективны для создания в России доверенной ЭКБ, предназначенной для работы в экстремальных условиях при радиационных воздействиях. Данные технологии позволяют создавать СБИС СнК и ОЗУ категории не хуже РС2 [1], содержащих десятки–сотни миллионов элементов на кристалле. Создание таких СБИС возможно при использовании методологии РСП [2, 3].

Дозовая стойкость КМОП nano-СБИС ОК

Дозовая стойкость nano-СБИС зависит от числа и состава элементов ее высокоинтегрированного ядра, а также от их конструктивных особенностей и электрического режима работы при облучении. В nano-СБИС в приборных МОПТ не наблюдается накопления заряда в подзатворном окисле, образования поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик — полупроводник, а также связанных с этим изменений электрических параметров и нарушения функционирования СБИС. Дозовая стойкость КМОП nano-СБИС ОК определяется исключительно допустимыми радиационными токами утечки паразитных n -МОП-транзисторных структур — «межприборными» и «внутритранзисторными» токами [2–4].

Для подавления «межприборных» утечек и повышения дозовой стойкости эффективно использовать «жесткую» p^+ -охрану в p -подложке и n^+ -охрану в n -«кармане», а также p^+ -охрану между областями n -«карман» — n^+ и n^+ — n^+ и специальных конструкций на их основе. Приводятся базовые конструкции элементов с p^+ -охраной такого типа [2, 3]. Данные конструкции позволяют также подавить эффект «зашелкивания» паразитных p - n - p -структур и повысить сбоеустойчивость элементов при воздействии тяжелых ядерных частиц.

«Внутритранзисторные» токи утечки наблюдаются между стоком в состоянии лог.1 и истоком в состоянии лог.0 линейного приборного n -МОПТ в областях перехода его поликремниевое затвора с тонкого подзатворного окисла на толстый. Они зависят от электрического режима работы соответствующего приборного

n-МОПТ при облучении, особенностей тестирования/измерения, а также от времени отжига после облучения и достаточно быстро восстанавливаются даже при нормальной температуре [4]. Для ослабления «внутритранзисторных» утечек возможно использование специальных конструкций *n*-МОПТ, в частности краевых «уширений» и кольцевых приборных *n*-МОПТ. Последнее допускается только для технологий с проектными нормами более 100 нм.

Для снижения всех видов радиационных токов утечки эффективно использовать технологическую опцию со слаботекущими HVT приборными *n*-МОПТ и быстроедействующими *p*-МОПТ — SVT.

Приводятся результаты исследования специальных тестовых кристаллов при воздействии стационарного ионизирующего облучения в различных электрических режимах и их переключении при облучении, а также отжига при прекращении облучения и отключении питания, позволяющие с использованием расчетно-экспериментальных методов корректно прогнозировать дозовую стойкость КМОП nano-SBIS ОК.

Заключение

На основе проведенных исследований разработаны конкретные технические решения элементов и СФ-блоков для создания КМОП nano-SBIS ОК с повышенными дозовой стойкостью, сбоеустойчивостью и отсутствием эффекта «зашелкивания» при радиационных воздействиях.

Литература

1. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Требования радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантия наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? // Наноиндустрия, 2017. — М.: ТЕХНОСФЕРА. — С. 32–36.
2. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я., Солохина Т. В. От первых КМОП-транзисторов до радиационно стойких нанометровых КМОП SBIS СнК // Наноиндустрия, 2019. Спецвыпуск (89). — М.: ТЕХНОСФЕРА. — С. 268–274.
3. Герасимов Ю. М., Петричкович Я. Я. Радиационно стойкие SBIS СнК и ОЗУ — особенности проектирования по КМОП-технологиям объемного кремния // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии, 2022. — Т. 5. — № 4. — С. 548–569.
4. Witzak S. C., Lacoé R. C., Osborn J. V., Hutson J. M., Moss S. C., Dose-Rate Sensitivity of Modern nMOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005. Vol. 52. № 6. P. 2602–2608.

УДК 621.3.049

Интегральный СШП-СКИ-трансивер

Маниленко И. Н., к. т. н., Каличкин С. В.

Разработки в области СШП-радио начались в СССР в 70-х годах. Первоначально импульсная локация была применена для измерения толщины льда на водоемах.

Основоположник современной UWB-связи Ларри Фулerton получил первый патент по UWB-связи.

В 1987 году была основана компания Time Domain (TDC).

В 2000-х гг. TDC выпустила первый чипсет с использованием технологии 125 нм и кремний-германия Pulson100. Тогда же была осуществлена интегральная реализация UWB-радиоканала.

После этого были приняты решения по частотной маске (ограничения по мощности на разных частотах в диапазоне 3–10,7 ГГц) и некоторые другие ограничения.

В дальнейшем были созданы специальные стандарты — IEEE802.15.4, в рамках которых допустимо коммерческое использование СШП-связи при исполнении требований Национальной частотной маски.

Сверхширокополосная связь на сверхкоротких импульсах (СШП-СКИ) развивается с момента появления технологии лучше 200 нм в 2000 году и обладает рядом достоинств:

- скрытность: работа под шумами — главное достоинство;
- компактность: габариты определяет размер антенны;
- низкая цена: определяется ценой обычной заказной ИС;
- высокая скорость передачи данных: ожидается более 10 Мб в секунду;
- возможность работы при активных помехах;
- высокая скорость передачи данных на единицу излученной мощности;
- возможность локального позиционирования в зоне работы нескольких передатчиков.

Если реализовать такой набор свойств в виде заказной ИС, то становится возможным построить широкий круг изделий, как то:

- скрытная тактическая связь;
- передача видеосигнала с БЛА в формате HD;
- радиокомандное управление;
- комбинированное управление с учетом возможности позиционирования;
- программирование снарядов вдогон.

После обоснования потребности в специализированной ИС были предприняты попытки получить соответствующий ОКР, работа дважды была доведена до согласованной ТЕМ карточки и отклонена, как утверждалось, из-за недостатка средств.

Имея уверенность в актуальности задачи и параллельно исполняя проект по СШП-локации, мы инициативно продвигали тему в фоновом режиме, своими силами. К настоящему моменту выполнена существенная часть работ в части проектирования ИС. Разработана блок-схема трансивера, разработаны и протестированы наиболее важные IP-блоки:

- ядро RISK-V-процессора;
- $\Delta\Sigma$ -АЦП второго порядка;

- многофазный генератор с временным шагом 25 пс с малым джиттером;
- быстродействующий УВХ.

На базе тестовых кристаллов и ПЛИС построены прототипы изделий, демонстрирующие реальные возможности СШП в части локального позиционирования.

Ведутся работы по реальному двунаправленному каналу связи с целью подтвердить ожидаемые характеристики.

При в целом глубокой многолетней проработке проекта ИС продолжению работы препятствует только отсутствие финансирования.

Литература

1. An Overview of Ultra Wideband 3rd Annual Winter Workshop for U.S. Army Vetronics Institute. January 15, 2004.
2. Правила проектирования для маршрута Н8 180 нм. — ПАО «Микрон», 2012.
3. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006.
4. Радзиевский В. Г., Трифонов П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. — М.: Радиотехника, 2009. — 288 с.: ил.
5. Анцев Г. В., Сарычев В. А., Копылов Е. Л., Французов А. Д. Математическое моделирование рупорной линейной антенны для сверхкоротких импульсов // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2005. — Т. 3. — № 3. — С. 56–58.
6. Smith Paul D., Cloude Shane R. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5, Kluwer Academic Publishers, New York, 2002.
7. Арслан Х., Чен Чж. Н., Бенедетто Н. Сверхширокополосная беспроводная связь: Пер. с англ. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. — 640 с.: ил.
8. Oppermann Ian, Namalainen Matti, Iinatti Jari. UWB Theory and application. John Wiley & Sons Ltd., 2004.
9. Радзиевский В. Г., Трифонов П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. — М.: Радиотехника, 2009. — 288 с.: ил.
10. Ultra-wideband radar technology / edited by James D. Taylor. London, CRC Press LLC, 2001.

УДК 621.396.673, SPIN-код: 2511-3920

Методика проектирования многочастотных вибраторных антенн с реактивными включениями

Бойко С. Н., к. ф.-м. н.

АО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»

111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

info@orkkniikp.ru, bosnik2012@yandex.ru

Кратко описана методика расчета КСВн, распределения тока по вибратору и диаграмм направленности, основанная на представлении многочастотного вибратора в виде эквивалентной длинной линии с реактивными включениями. Приведены результаты расчета распределения тока и диаграмм направленности в вибраторе с двумя включениями в виде параллельных LC-контуров, показан эффект отсечки токов за контурами, обеспечивающий идентичные ДН на резонансных частотах.

Ключевые слова: многочастотная вибраторная антенна; длинная линия; реактивное включение; LC-контур; распределение тока; диаграмма направленности.

Введение

В последнее десятилетие определяющим трендом развития аппаратуры УКВ-диапазона стала интеграция систем различного назначения (связь, навигация, разведка, управление, SDR-приемо-передатчики) в едином аппаратном комплексе. В связи с этим особую актуальность приобрел вопрос конструирования многочастотных антенн, в частности многочастотных вибраторных и микрополосковых антенн.

Многочастотный режим работы вибраторов достигается несколькими способами: введением переключателя и схем согласования монополя на заданные частоты, введением коаксиальных шунтов в начале вибратора, введением нескольких вибраторов, питаемых из одного источника через схему суммирования и фильтрации, введением реактивных включений в плечи вибратора. Достоинствами вибраторной антенны с реактивными включениями являются простота конструкции и технологичность изготовления, высокий коэффициент полезного действия. Основная трудность при проектировании вибраторных антенн с реактивными включениями состоит в обеспечении согласования с питающим фидерным трактом и достижении идентичности формы ДН в нескольких рабочих диапазонах частот.

Суть предложенной методики

Методика проектирования многочастотных вибраторных антенн с реактивными включениями основана на последовательном применении теории длинных линий к различным участкам вибратора как при определении входных характеристик вибратора, так и при расчете распределения тока вдоль вибратора [1, 2]. Эквивалентность такой замены подразумевает равенство погонных параметров линии и соответствующих параметров антенны [3].

Обычно в многочастотных вибраторных антеннах применяют включения индуктивного типа. Однако индуктивные включения не обеспечивают отсечку токов на высших рабочих частотах, что приводит к различиям в диаграммах направленности на разных частотах. Эти различия могут быть весьма существенными, что

не всегда приемлемо. Поэтому логичным выглядит переход к реактивным включениям резонансного типа [4].

На рис. 1 приведены расчетные параметры вибратора (монополя) для частот 121,5, 162 и 406 МГц с двумя включениями в виде параллельных LC -контуров. Разрывы в диэлектрическом стержне, заполненные диэлектриком, образуют емкости $C_1 = 1$ пФ, $C_2 = 13$ пФ, значения индуктивностей составили $L_1 = 80$ нГн, $L_2 = 95$ нГн.

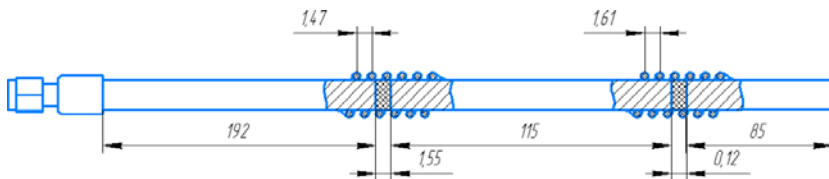


Рис. 1. Общий вид трехчастотной вибраторной антенны с двумя параллельными LC -контурами

На рис. 2 представлены распределения тока вдоль вибратора, а также форма ДН для трех рабочих частот.

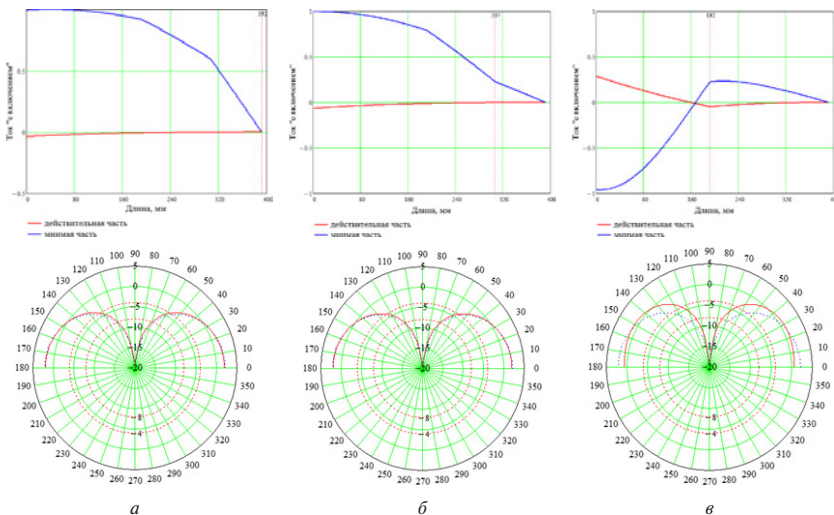


Рис. 2. Расчетные распределения токов и ДН на частотах 121,5 (а), 162 (б) и 406 МГц (в)

Из рис. 2 видно, что в вибраторе происходит отсечка токов на частотах 162 и 406 МГц, вследствие чего ДН на всех рабочих частотах практически идентичны. Таким образом, в вибраторе с включениями в виде параллельных LC -контуров реализуется идея «вложенных» друг в друга четвертьволновых вибраторов.

Данная методика распространена на проектирование многочастотных микрополосковых антенн, а также частотно-селективных поверхностей и метаматериалов.

Заключение

Предложенная методика проста в применении и позволяет существенно ускорить процесс проектирования многочастотных вибраторных и микрополосковых антенн с идентичными ДН для многопрофильной аппаратуры, включая SDR-приемо-передатчики.

Литература

1. Бойко С. Н., Зевакин Е. А., Корышев О. В., Трухачев И. М. Методика расчета входных характеристик вибраторной антенны с реактивными включениями // Радиотехника, 2020. — Т. 84. — № 5 (10). — С. 53–66.
2. Бойко С. Н., Зевакин Е. А., Корышев О. В., Трухачев И. М. Методика проектирования спиральных вибраторных антенн с реактивными включениями // Антенны, 2020. — № 6 (268). — С. 54–67.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.
4. Бойко С. Н., Егиазарян А. М., Корышев О. В., Трухачев И. М. Проектирование многочастотной вибраторной антенны с включениями в виде параллельных LC-контуров // Радиотехника, 2022. — Т. 86. — № 5. — С. 145–157.

УДК 621.372.412

Термостатированные кварцевые генераторы с высокой механической прочностью

Ложников А. О., к. т. н.

АО «ОНИИП»

644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231

crystal@oniip.ru

Приводятся особенности конструкции высокостабильных кварцевых генераторов на основе резонаторов-термостатов с высокой механической прочностью. Обосновывается применение амортизаторов внутри корпуса для ударной и вибрационной защиты самого слабого элемента — резонатора-термостата.

Ключевые слова: кварцевый генератор; амортизатор; фазовые шумы; широкополосная случайная вибрация.

Введение

Современные тенденции развития ЭКБ для бортовой и специальной аппаратуры требуют создания частотозадающих компонентов с повышенной стойкостью к внешним воздействующим факторам (ВВФ), в основном механическим, климатическим и специальным [1]. Часто требуются высокостабильные кварцевые генераторы на основе резонаторов-термостатов. Такие генераторы обладают энергопотреблением, в 4–10 раз меньшим по сравнению с генераторами традиционной конструкции, и готовы к работе через 5–15 секунд после включения. Но они обладают существенным недостатком — низкой механической прочностью из-за конструкции резонатора-термостата. Собственные резонансные частоты таких конструкций меньше 2 кГц, поэтому им требуется защита.

Обоснование конструктивных решений генераторов

Для обеспечения механической прочности возможно усилить внутреннюю конструкцию резонатора термостата, при этом потеряется главное его преимущество — низкое энергопотребление. Если печатный узел со схемой автогенератора и резонатором поместить в амортизатор с собственной резонансной частотой, которая ниже частот конструкции кварцевого резонатора-термостата [2], существенно повышается механическая прочность.

Конструкция такого генератора описана в работе [3]. Амортизатор выполнен из резиновой смеси и обеспечивает прочность генератора после воздействия широкополосной случайной вибрации со среднеквадратичным значением 10–15 г в диапазоне частот 10–2000 Гц и одиночных ударов 1500 г. Собственная резонансная частота амортизатора с установленным в него печатным узлом составляет 800–1000 Гц, что обеспечивает механическую защиту резонатора-термостата во время вибрационных и ударных воздействий.

В кварцевых генераторах определить собственные резонансные частоты конструкции можно измерением фазовых шумов во время воздействия широкополосной случайной вибрации. Это связано с тем, что кварц — пьезоэлектрик и все механические воздействия передаются на него, отражаясь на графике спектральной плотности мощности фазовых шумов. Так как представленный амортизатор имеет относительно высокую резонансную частоту, во время вибрации уровень фазовых

шумов ухудшается. К примеру, типовое значение ухудшения уровня фазовых шумов при воздействии широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот 10–2000 Гц со среднеквадратичным значением ускорения 15 g составляет 45 дБ/Гц.

Для обеспечения работоспособности приборов, требующих сохранения фазовых шумов кварцевого генератора во время вибрационных нагрузок, необходимо уменьшать резонансную частоту амортизатора. Один из примеров — генератор АХИОМ210 фирмы Axtal [4]. Он имеет большие габаритные размеры и в шесть раз больший объем, чем у описанного в работе [3] генератора, что позволило снизить резонансную частоту амортизатора до 30–40 Гц. Это позволило сохранить уровень фазовых шумов при отстройке от несущей больше 100 Гц во время воздействия вибрации.

Заключение

Применение амортизаторов в кварцевых генераторах позволяет обеспечить их высокую прочность к механическим нагрузкам. Для сохранения низкого уровня фазовых шумов при вибрационных воздействиях необходимо существенно увеличить его габаритные размеры.

Литература

1. Ложников А. О. Перспективные образцы кварцевых и СВЧ-генераторов для ответственных применений // Наноиндустрия, 2021. — Вып. S7 (107).
2. Ложников А. О. Термостатированные кварцевые генераторы для специальных применений // Решетневские чтения: материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года. Часть 1. — Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. — С. 374–375.
3. Ложников А. О., Карагусов В. И., Розанова А. В. Термостатированный кварцевый генератор с диапазоном частот 80–130 МГц // Техника радиосвязи, 2019. — Вып. 4 (43).
4. АХИОМ210 фирмы Axtal. — URL: <https://www.axtal.com/cms/docs/doc91842.pdf> (дата обращения: 14.08.2023).

УДК 629.056.8

Высокоточная спутниковая навигационная аппаратура для частотно-временных задач и позиционирования**Вейцель А. В., к. т. н.^{1,2}**¹ ФГУП «ВНИИФТРИ»*141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево
vejtselav@mail.ru*² Московский авиационный институт*125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4*

Рассматриваются особенности разработки и проектирования высокоточной спутниковой навигационной аппаратуры для частотно-временных задач и позиционирования. Приводится анализ основных ошибок и методов борьбы с ними для такого класса оборудования. Рассматриваются подходы к построению аналоговых радиотрактов и цифровых каналов обработки сигналов с учетом разработки СБИС. Анализируются перспективы разработки новой современной высокоточной аппаратуры.

Ключевые слова: сигналы ГЛОНАСС и ГНСС; СБИС; высокоточная синхронизация; высокоточная навигационная аппаратура.

Спутниковая навигационная аппаратура применяется для широкого ряда задач, включая такие критические задачи, как частотно-временное обеспечение и системы синхронизации. Также высокоточная спутниковая навигационная аппаратура применяется для различного класса задач, начиная от геодезических применений, использования в системах управления различной техникой и системах мониторинга и формирования высокоточных коррекций. Для всех этих задач в навигационной аппаратуре необходимо обеспечить прием сигналов от всех ГНСС в разных навигационных диапазонах и минимизацию различных ошибок. Для решения этих задач в навигационной аппаратуре реализуется несколько аналоговых радиотрактов для приема сигналов от разных навигационных систем в разных частотных диапазонах. В работе рассматриваются особенности построения аналоговых радиотрактов для возможности минимизации возможных ошибок навигационной аппаратуры и методики расчета этих ошибок. Также рассматриваются различные технические решения по уменьшению ошибок частотно-временной синхронизации и местоопределения при изготовлении и производстве навигационной аппаратуры с учетом возможностей специализированной калибровки оборудования.

Одним из основных компонентов навигационной аппаратуры является часть, отвечающая за цифровую обработку сигналов. Обычно базовым компонентом, реализующим цифровую обработку сигналов, является СБИС, в которой реализуются самые высокоскоростные алгоритмы цифровой обработки и цифровое процессорное устройство с программной реализацией алгоритмов. В работе рассматриваются особенности проектирования цифровой обработки сигналов для высокоточной навигационной аппаратуры и реализация технических решений для частотно-временных задач. Рассматриваются режимы синхронизации шкалы времени навигационного приемника с внешней шкалой времени с использованием программно-аппаратных решений.

Цифровая обработка сигналов может быть выполнена с ПЛИС или СБИС. В работе анализируются возможности использования ПЛИС и СБИС для высокоточной навигационной аппаратуры и сравниваются возможные характеристики. Рассматриваются варианты построения СБИС от реализации только аппаратной логики с цифровыми каналами до СБИС, являющейся системой на кристалле (SoC), со специализированными процессорами для цифровой обработки сигналов. Необходимость приема и обработки множества сигналов и навигационных систем накладывает особые ограничения на цифровые процессоры, которые реализуют программную часть алгоритмов по обработке сигналов. С учетом ограничений разработки СБИС и особенностей технологий рассматриваются подходы использования мультипроцессорных систем для спутниковых навигационных приемников. Приводятся возможности и подходы к разделению цифровой обработки на мультипроцессорные системы, а также на аппаратную цифровую и программную части. Также в работе приводятся возможности систем в корпусе (SiP), которые позволяют уменьшать габариты разрабатываемых изделий, и приводится анализ возможностей по интегрированию компонентов в системы на кристалле.

Для высокоточных задач мониторинга, позиционирования и частотно-временной синхронизации существуют требования по минимизации ошибок измерений комплекса средств, в которых используется навигационный приемник. В работе рассматриваются такие ошибки и методы их анализа, а также подходы к построению аппаратуры с минимизацией этих аппаратных погрешностей и методы оценки таких ошибок. В выводах работы анализируются возможности создания нового поколения высокоточной навигационной аппаратуры.

УДК 621.382.323

Анализ и оптимизация усилителя промежуточной частоты с повышенной чувствительностью и напряжением питания 1 В

Суэтинов В. И., Полевиков В. В., Шомахмадов Д. П.

*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6**visuetin6491@gmail.com, polevikov@zntc.ru, shomahmadov@zntc.ru*

В данной работе проводится сравнение различных архитектур построения каналов ПЧ интегральных радиоприемников и, в частности, входных усилителей. Приводится описание усилителя ПЧ, выполненного по 40-нм КМОП-технологии с напряжением питания 1,2 В, со значительно улучшенной чувствительностью и малой потребляемой мощностью.

Ключевые слова: низкочастотный канал; приведенный ко входу шум; обратная связь; операционный усилитель.

Введение

Настоящая работа посвящена низкочастотным блокам интегральных радиоприемников, выполненных по КМОП-технологии и предназначенных для широкого применения в радиосвязи, в том числе мобильной связи, медицине, Интернете вещей и т. д. Скорость передачи информации в радиоприемных устройствах определяет полосу пропускания усилителя промежуточной частоты (ПЧ). Поскольку эта скорость сильно варьируется в зависимости от области применения, то усилитель ПЧ должен обладать способностью к перестройке с тем, чтобы потребляемый ток оставался минимально необходимым для заданной полосы [1]. Другое важное требование к каналу ПЧ — это чувствительность, достижение которой осложняется наличием значительного фликкер-шума в МДП-транзисторах на низких частотах, особенно вблизи нуля [2].

В предлагаемой работе решалась задача значительно улучшить чувствительность без увеличения потребляемого тока.

Предлагаемая схема промежуточного усилителя

Рассмотрение входных каскадов усилителей ПЧ показало, что традиционные каскады на основе операционных усилителей (ОУ) с резистивными обратными связями (ОС) не способны значительно улучшить чувствительность из-за вклада резисторов в шумовое напряжение. В результате анализа была выбрана комбинация дифференциального каскада с усилителем тока на основе операционного усилителя с парафазным выходом. В данной конфигурации входной дифференциальный каскад, по существу, является преобразователем напряжения в ток, поскольку входной импеданс усилителя тока намного меньше, чем нагрузка каскада. Такая комбинация улучшает линейность и дает возможность применить в качестве нагрузки источники тока на основе транзисторов в диодном включении, а также настраивать ток смещения без заметного изменения синфазного выходного сигнала.

Примененный операционный усилитель с парафазным выходом имеет входной каскад, подобный описанному ранее, что обеспечивает непосредственное подключение двух выходных инверторов. Резисторы, включенные между входами и выходами ОУ, превращают его в усилитель тока.



Для задания синфазного напряжения на выходе схемы ОУ используется компаратор, который устанавливает необходимое синфазное напряжение, управляя напряжением на соединенных затворах транзисторов нагрузки входного дифференциального каскада.

Коэффициент усиления описанной схемы определяется крутизной входного дифференциального каскада gm и сопротивлением в ОС R_f и дается выражением

$$Gain = 2 \cdot gm \cdot R_f, \quad (1)$$

где $gm = I_o/(4 \cdot V_t)$, I_o — ток, V_t — тепловое напряжение.

В результате коэффициент усиления есть функция тока входного каскада и сопротивления обратной связи:

$$Gain = I_o \cdot R_f / (2 \cdot V_t). \quad (2)$$

Таким образом, усиление можно менять как за счет тока смещения, так и за счет сопротивлений ОС. При этом следует принимать во внимание, что изменение тока влечет изменение приведенного ко входу шума, а изменение величины резистора — к изменению верхней полосы пропускания. Последняя может также настраиваться с помощью емкостей, включенных параллельно резисторам.

Например, при токе 400 мкА и $R_f = 10$ кОм приведенный ко входу шум составляет 2,6 нВ/√Гц на частоте 100 кГц, а коэффициент усиления — 40 (32 дБ). При токе 200 мкА — соответственно 3,6 нВ и 26 дБ. Максимальный коэффициент усиления схемы может достигать 60 дБ и более.

Для компенсации напряжений смещения в дифференциальном каскаде и усилителе тока используется 100 %-я обратная связь, образованная компаратором, подключенным к выходам усилителя тока, и дифференциальным преобразователем напряжения в ток, подсоединенным к токовым выходам входного каскада. Для регулировки нижней полосы пропускания до 1 кГц и менее целесообразно использовать внешний конденсатор, который задает необходимую частоту отсечки.

Заключение

Предлагаемый входной усилитель тракта ПЧ с напряжением питания 1,2 В осуществляет программирование таких параметров, как чувствительность, коэффициент усиления, нижняя и верхняя границы полосы пропускания при минимальном необходимом токе. В частности, для чувствительности 2,7 нВ/√Гц, коэффициента усиления 56 дБ общий потребляемый ток составляет 680 мкА, а потребляемая мощность — 0,82 мВт.

Литература

1. Сузгинов В. И., Шомахмадов Д. П., Силаев А. С. Проектирование экономичной и устойчивой к разбросу по процессу и температуре интегральной микросхемы низкочастотного канала для радиоприемника // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем (МЭС)». — Москва, 2021. — С. 195–201.
2. Qiangian Li, Shunli Ma, Fan Ye, Junyan Ren. A Low-Power PGA with DC-offset Cancellation in 65 nm CMOS Process // 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). — Hangzhou: 2016.

УДК 621.372.63

Создание STW-резонаторов с повышенной добротностью до 11000, улучшенной температурной стабильностью в расширенном частотном диапазоне до 1000 МГц в миниатюрных SMD-корпусах 3×3×1,8 мм

Доберштейн С. А.^{1,2}, Веремеев И. В.^{1,2}, Разгоняев В. К.²

¹ АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»
644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231

² Омский научный центр СО РАН
(Институт радиофизики и физической электроники)
644024, г. Омск, просп. К. Маркса, 15
sergei.doberstein@mail.ru, veremeev89@ya.ru, razgonvc@mail.ru

Представлены результаты научных исследований, полученные при разработке СВЧ-резонаторов на высокоскоростных поверхностных поперечных волнах — STW. Показано, что в результате оптимизации топологических и технологических параметров резонаторов получены высокие добротности, уменьшенные размеры и улучшенная температурная стабильность.

Ключевые слова: поверхностные поперечные волны; резонатор; добротность.

Введение

Поверхностные поперечные акустические волны (Surface Transverse Waves — STW) — разновидность поверхностных акустических волн (ПАВ) на кварце, они имеют высокую скорость распространения 5000 м/с, что обеспечивает ширину электрода и зазора встречно-штыревого преобразователя (ВШП) 1,25–1,63 мкм в диапазоне частот 766–1000 МГц. Это облегчает фотолитографию и позволяет успешно использовать STW для создания СВЧ-резонаторов с высокой добротностью и малыми размерами [1–3]. В работе исследованы асинхронные миниатюрные STW-резонаторы с высокой добротностью на срезе УХ/36° + 90° кварца. Резонаторы выполнялись по одновходовой схеме, когда ВШП располагался между двумя отражательными решетками (ОР) с закороченными электродами.

Добротность таких резонаторов определяется отражательной способностью ОР при всех равных условиях — минимуме потерь на распространение и на проводимость алюминиевых электродов в ВШП при заданной толщине и коэффициенте металлизации электродов. Отражательная способность ОР зависит от толщины металлизации h и коэффициента металлизации K_m электродов, а также от соотношения между периодами электродов ОР и ВШП (асинхронности топологии).

Расчетные и экспериментальные данные

Конструктивно-топологическая оптимизация STW-резонаторов проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием модели эквивалентных схем [3]. STW-резонаторы на частоты 766 и 1000 МГц обеспечили типовые добротности 7000 и 6000 соответственно при $K_m = 0,45-0,5$, относительной толщине металлизации $h/\lambda = 2\%$ (λ — длина STW на центральной частоте), уменьшенные размеры [3, 4] по сравнению с известными прототипами [1, 2] и помещались в SMD-корпуса размерами 3×3×1,8 мм.

Расчеты и эксперименты показали, что уменьшение добротности STW-резонаторов в диапазоне частот >700 МГц связано с падением отражательной способности ОР и рассеиванием энергии STW в объемные волны. Для увеличения отражательной способности ОР и уменьшения рассеивания STW проведены исследования по увеличению толщины металлизации h и коэффициента металлизации электродов K_m .

Показано, что увеличение коэффициента металлизации до 0,55, относительной толщины металлизации до 2,5% привело к увеличению добротности асинхронных STW-резонаторов в диапазоне частот 700–1000 МГц до 8600–11000, как у лучших мировых образцов. STW-резонаторы имеют ТКЧ = $-0,043 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}^2$ в диапазоне температур от -60 до 85°C , что свидетельствует об улучшенной температурной стабильности, соизмеримой с температурной стабильностью обычных резонаторов на ПАВ на кварце.

Заключение

Рассмотренные конструктивные и технологические решения позволяют увеличить отражательную способность ОР, уменьшить рассеивание энергии STW в объемные волны и увеличить добротность. Генераторы на основе созданных STW-резонаторов имеют низкие шумы, меньшую потребляемую мощность, чем традиционные кварцевые генераторы, а также расширенный диапазон рабочих частот по сравнению с обычными генераторами на ПАВ. STW-резонаторы с улучшенными параметрами позволят расширить сферу их применения для аппаратуры частотной фильтрации и частотной стабилизации, обеспечить импортозамещение и повысить конкурентоспособность российской ЭКБ.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3)

Литература

1. Friedt J.-M et al. Design of Asynchronous STW Resonators for Filters and High Stability Source Applications // Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2005. P. 1315–1318.
2. Kim C. U. et al. High Q-factor STW-Resonators on AT-Cut of Quartz // Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2007. P. 2582–2585.
3. Доберштейн С.А., Веремеев И.В., Разгоняев В.К. Асинхронные резонаторы на STW с высокой добротностью и уменьшенными размерами // Радиотехника, 2023. — Т. 87. — № 7. — С. 137–144.
4. Доберштейн С.А., Веремеев И.В. Асинхронный резонатор на поперечных поверхностных акустических волнах. Патент РФ на полезную модель № 212600, Н03Н 9/25, Н03Н 9/19, заявл. 09.03.2022, опубл. 01.08.2022, Б.И. № 22.

УДК 004

Актуальные вопросы создания отечественной аппаратуры позиционирования внутри помещений

Полторацкий В. Е., к. т. н., Заславский Е. Л.

ОАО «АМТ-ГРУПП»

141090, г. Королев, ул. Большая Комитетская, 28

info@transnetiq.ru

Рассматривается классификация локальных систем позиционирования, indoor-позиционирования. По субъективным и объективным причинам такие системы в настоящий момент развиты меньше, чем глобальные спутниковые, однако представляют значительный коммерческий и технический интерес. Рассмотрены варианты таких решений и возникающие при этом проблемы.

Ключевые слова: позиционирование; точность позиционирования; решение стандартной навигационной задачи; навигационные протоколы; оборудование.

Внедрение технологий indoor-позиционирования позволяет решать множество важных и коммерчески перспективных задач, таких как создание интерактивной навигации в торговых центрах, контроль передвижения сотрудников и гостей как в офисных, так и в производственных условиях, создание полностью роботизированных производств и складов.

Системы indoor-навигации — это практически полностью коммерческие проекты, что, с одной стороны, дает дополнительные возможности, но, с другой стороны, ведет к возникновению множества проблем. Основная — большое количество различных стандартов систем позиционирования, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Проведенный анализ показал, что ни одна из имеющихся технологий indoor-навигации не позволяет получить готовое решение за счет имеющегося на рынке оборудования. Основная проблема всех технологий, использующих стандартные протоколы, состоит в низкой точности определения местоположения.

В настоящий момент работа ведется по двум направлениям. Первое — это разработка оборудования для одновременно нескольких технологий позиционирования. Второе — это создание многоуровневого программного обеспечения, которое позволит решать навигационную задачу по данным от многих систем с достаточной скоростью и точностью.

Литература

1. Гансвинд И. Н. Глобальные навигационные спутниковые системы // [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.chronos.msu.ru/nameindex/gansvind.html>.
2. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем. — Москва: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. — Т. 2. — 360 с.
3. Бердников В. М. Алгоритм многокритериального синтеза навигационных сигналов с наименьшей вероятностью классификации вида модуляции // Вестник РГРТУ. — Рязань, 2012. — Вып. 41. — С. 41–45.

УДК 629.3.052

Технология интеллектуальной навигации на основе комплексирования ЛСН проекта «КОНСУЛ» и данных лазерной локации

Старовойтов Е. И.

АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

info@i-progress.tech

В работе представлена технология интеллектуальной навигации, основанная на комплексировании ЛСН проекта «КОНСУЛ» с данными от лазерных локационных систем и от датчиков других типов. Данная технология предназначена для бесшовной навигации беспилотного транспорта и мобильных роботов в условиях постоянного или периодического отсутствия навигационных сигналов ГНСС и ЛСН.

Ключевые слова: ЛСН; лазерная локация; комплексирование; беспилотный транспорт; мобильный робот.

Введение

Навигация беспилотных транспортных средств (БТС) выполняется по данным глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) или локальных систем навигации (ЛСН) [1], но в условиях плотной застройки может происходить частичная или полная потеря сигнала и для продолжения движения потребуется информация от датчиков других типов.

Комплексирование ЛСН и ЛЛС

Полностью автономная навигация БТС достигается с помощью инерциальных приборов и одометров, использование которых приводит к дополнительной погрешности. Инерциальные приборы даже высокого класса точности не обеспечивают в течение продолжительного времени без коррекции погрешность позиционирования менее 0,2–0,4 м, но при этом имеют цену, сопоставимую со стоимостью БТС. Пробуксовка, блокировка, прогиб под весом БТС, разная скорость вращения и отклонение формы колес от окружности приводят к погрешности измерений одометра.

В состав бортовых датчиков БТС входят лазерные локационные системы (ЛЛС) или «лидары», используемые для обнаружения препятствий и кругового обзора. Результаты экспериментов показывают возможность автономной навигации БТС с погрешностью 0,1–0,2 м по «облаку точек», полученному ЛЛС с оптико-механическим сканированием [2]. При этом требования к погрешности определения координат БТС составляют 0,1 м в плане [3], а при скорости движения около 150 км/ч и погрешности измерений ЛЛС 0,1 м частота обновления навигационной информации должна быть более 400 Гц.

Основная причина низкой частоты выдачи информации серийных ЛЛС вызвана ограничениями при оптико-механическом сканировании зоны обзора, длительность которого равна [4]

$$t = 2 \cdot N_b \cdot N_r \cdot D / (f_{\max} \cdot c), \quad (1)$$

где N_n , N_r — число зондирующих импульсов в азимутальной и угломестной плоскостях; D — дальность измерений; f_{\max} — максимальная частота повторения зондирующих импульсов; c — скорость света в вакууме.

Альтернативой оптико-механическому сканированию является технология 3D Flash Ladar, позволяющая получить «облако точек» при однократном зондировании. Обеспечивается высокая частота выдачи информации, но эти ЛЛС требуют более мощной подсветки. Если для измерения на предельной дальности с использованием одноэлементного ФПУ достаточно энергии зондирующего импульса E_0 , то при использовании 3D Flash Ladar энергия импульса увеличивается до значения

$$E_{3D} = m \cdot n \cdot E_0, \quad (2)$$

так как нужно подсвечивать одновременно $m \cdot n$ элементов разрешения.

Перспективной выглядит гибридная схема ЛЛС с использованием линейного ФПУ и сканированием по одной оси, обладающая преимуществами ЛЛС обоих типов [5]. Для гибридной схемы энергия зондирующего импульса равна

$$E_{\text{гиб}} = m \cdot E_0. \quad (3)$$

Схема интеллектуальной навигационной системы, предназначенной для определения местоположения БТС, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема интеллектуальной навигационной системы БТС

В этой системе с помощью нейропроцессорных вычислителей реализуются алгоритмы навигации с использованием методов искусственного интеллекта для анализа полного набора доступных навигационных данных от датчиков разных типов.

Заключение

Оценки показывают, что для непрерывной навигации БТС при движении в городе с погрешностями, обеспечиваемыми ГНСС, может быть использовано комплексирование абонентского терминала ЛСН с ЛЛС различной конструкции.

Литература

1. Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С. Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // Наоиндустрия. Спецвыпуск, 2021. — 7с. — Т. 14 (107). — С. 57–59.
2. Kim K., Im Ju., Jee G. Tunnel Facility-based Vehicle Localization in Highway Tunnel using 3D LIDAR // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol. 23. Iss. 10. October 2022. P. 17575–17583. DOI: 10.1109/TITS.2022.3160235.
3. Чикрин Д. Е., Егорчев А. А., Голоусов С. В. и др. Интегрированные системы высокоточной спутниково-локально-инерциальной навигации в задачах беспилотного управления транспортными средствами // Международный форум «Микроэлектроника-2018». 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — С. 60–63.
4. Бондаренко А. В., Бондаренко М. А., Докучаев И. В. Аппаратная реализация бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения мобильной техники // Механика, управление и информатика, 2012. — № 3 (9). — С. 95–102.
5. Грязнов Н. А., Купренюк В. И., Соснов Е. Н. Лазерная информационная система обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал, 2015. — Т. 82. — № 5. — С. 27–33.

УДК 629.783

Совместное использование потоков поправок PPP-B2b и HAS

Мамаев А. А.

ООО «4ГНСС»

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1
a.tamaev@orsyst.ru

Рассмотрен метод, который позволяет совместно использовать два потока поправок: PPP-B2b от BeiDou и HAS от Galileo. В результате существенно увеличивается число доступных спутников, что является критически важным для режима PPP. Метод состоит в модификации общепринятой модели наблюдения.

Ключевые слова: высокоточное позиционирование; абсолютное позиционирование; PPP; PPP-B2b; HAS.

Введение

Режим высокоточного абсолютного позиционирования, или PPP (Precise Point Positioning) [1], получил большое распространение в последние два десятилетия. Он обеспечивает дециметровую или сантиметровую точность и при этом не требует потока дифференциальных поправок с находящейся поблизости базовой станции. Вместо этого используются глобальные поправки к широкоэшелетельным орбитам и часам навигационных спутников [2]. В результате приемник может работать в данном режиме вне густой сети базовых станций, в слабозаселенных регионах и на море. Единственной трудностью является доставка глобальных поправок пользователю.

Важным шагом к повсеместной доступности PPP стал запуск некоммерческих сервисов поправок PPP-B2b [3] и HAS [4]. Новые потоки ведут трансляцию прямо с орбиты, но имеют общий недостаток — ограниченный набор поправок. Действительно, HAS поддерживает только две системы, GPS и Galileo [4], а PPP-B2b транслирует поправки только для тех спутников GPS и BeiDou, которые видны наземным станциям слежения на территории Китая [5]. В данной работе предложен способ совместной обработки этих двух потоков для обеспечения качественной работы PPP на всей территории страны.

Модель наблюдения для смешанного набора поправок

В режиме PPP для определения позиции приемника используются кодовые и фазовые измерения дальности. Для спутника s и сигнала i измерения описываются уравнениями

$$P_i^s = \rho(x, y, z, x^s, y^s, z^s) + c(dt - dt^s) + T^s + I_i^s + e, \quad (1)$$

$$L_i^s = \rho(x, y, z, x^s, y^s, z^s) + c(dt - dt^s) + T^s - I_i^s + \lambda_i(N_i^s + w^s) + \epsilon, \quad (2)$$

где P_i^s — кодовое измерение; L_i^s — фазовое измерение; $\rho(\cdot)$ — расстояние, пройденное сигналом; x, y, z — координаты приемника; x^s, y^s, z^s — координаты спутника; c — скорость света в вакууме; dt — ошибка часов приемника; dt^s — ошибка часов спутника; T^s — тропосферная задержка; I_i^s — ионосферная задержка; λ_i — длина

волны; N_i^s — фазовая неоднозначность; w^s — накрутка фазы вследствие вращения спутника; e, ϵ — шум измерений.

После обработки измерений в рамках модели (1), (2) мы получим координаты приемника в той системе отсчета, в которой были представлены орбиты спутников. Аналогично ошибка часов приемника будет определена относительно той шкалы времени, относительно которой были представлены ошибки часов спутника. HAS и PPP-B2b используют разные системы отсчета и разные шкалы времени [3, 4]. Это означает, что мы не можем использовать в уравнениях (1), (2) одно и то же сочетание координат и ошибки часов приемника для всех спутников. Вместо этого мы выберем один из потоков в качестве опорного и будем использовать для спутников с поправками из этого потока уравнения (1), (2), а для остальных спутников рассмотрим модифицированную систему уравнений

$$P_i^s = \rho(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, x^s, y^s, z^s) + c(dt + \delta t - dt^s) + T^s + I_i^s + e, \quad (3)$$

$$L_i^s = \rho(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, x^s, y^s, z^s) + c(dt + \delta t - dt^s) + T^s - I_i^s + \lambda_i(N_i^s + w^s) + \epsilon, \quad (4)$$

где $\delta x, \delta y, \delta z$ — смещение между системами отсчета, δt — смещение между шкалами времени.

Заключение

Сервисы PPP-B2b и HAS обеспечивают доступ к режиму PPP широкому кругу пользователей на некоммерческой основе. Недостатком сервисов является ограниченное число спутников, для которых доступны поправки. Предложенный метод позволяет использовать оба потока поправок совместно, это увеличивает число спутников с точными поправками и обеспечивает качественную работу PPP на всей территории России.

Литература

1. Kouba J., Lahaye F. and Tetreault P. Precise Point Positioning, chapter 25. Springer International Publishing, Cham, 2017. P. 723–751.
2. RTCM Special Committee. (2022). Differential GNSS (global navigation satellite systems) services: Version 3 (RTCM Standard 10403.3).
3. CSNO. (2020). BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document precise point positioning service signal PPP-B2b (Version 1.0).
4. European Union (2022) Galileo High Accuracy Service signal-in-space interface control document (HAS SIS ICD), Issue 1.0.
5. Nie Z., Xu X., Wang Z., Du J. Initial Assessment of BDS PPP-B2b Service: Precision of Orbit and Clock Corrections, and PPP Performance // Remote Sens., 2021, 13, 2050.

УДК 004.087.2

Особенности разработки высокопроизводительной подсистемы обработки команд современных контроллеров твердотельных накопителей информации

Любавин К. Д.^{1,2}¹ АО «Крафтвэй Корпорэйшн ПЛС»

129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16, стр. 60

klyubavin@kraftway.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлен ряд результатов создания высокопроизводительной подсистемы обработки команд современных контроллеров твердотельных накопителей информации в соответствии с NVMe-стандартом. Описаны решения, которые использованы для увеличения производительности устройства. Приведены полученные оценочные результаты производительности и площади разработанного блока.

Ключевые слова: NVMe; контроллер команд; твердотельные накопители информации; высокопроизводительные SSD; особенности разработки подсистемы обработки команд.

Введение

В настоящее время твердотельные накопители информации (ТНИ) приобретают все большую популярность во всех сферах хранения информации. Данный класс устройств является ключевым для развития как систем хранения информации (СХД), так и для всей ИТ сферы в целом. Это обуславливается высоким темпом развития данных отраслей, постоянно увеличивающимися требованиями к скорости передачи данных, производительности, общему объему носителей и энергопотреблению устройств хранения информации. Коллектив сотрудников АО «Крафтвэй Корпорэйшн ПЛС» активно ведет исследования и разработку высокопроизводительных контроллеров ТНИ. Актуальность представленной работы заключается в разработке отечественного высокопроизводительного контроллера ТНИ второго поколения и исследовании особенностей разработки устройств данного класса.

Особенности подсистемы обработки команд

В состав подсистемы обработки команд доступа (рис. 1) входят: 64-разрядное ядро RISC-V, блок плотносопряженной памяти (Tightly Coupled Memory, TCM) и контроллер первичной обработки команд в соответствии со стандартом NVMe версии 1.4a (NVMe Controller) [1, 2].

При разработке данного устройства реализован ряд аппаратных решений, направленных на повышение его быстродействия, таких как:

- автоматический прием и сортировка команд, полученных от хоста, по типам и приоритету (Submission Queue, SQ);
- программируемый контроллер генерации прерываний для событий различных классов;

- автоматическое размещение тела команды и его метаданных в некешируемой области TCM-памяти процессора;
- высокопроизводительный модуль передачи данных из памяти хоста во внутреннюю память устройства;
- автоматическая отправка подтверждения обработки команды хост-устройству (Completion Queue, CQ) с определением наличия свободного места в буфере приема команд в памяти хоста [3];
- блок высокопроизводительной передачи проприетарных команд взаимодействия с подсистемой Flash Transfer Level (FTL);
- модуль автоматической генерации прерываний MSI/MSI-X для взаимодействия с PCI-Express.

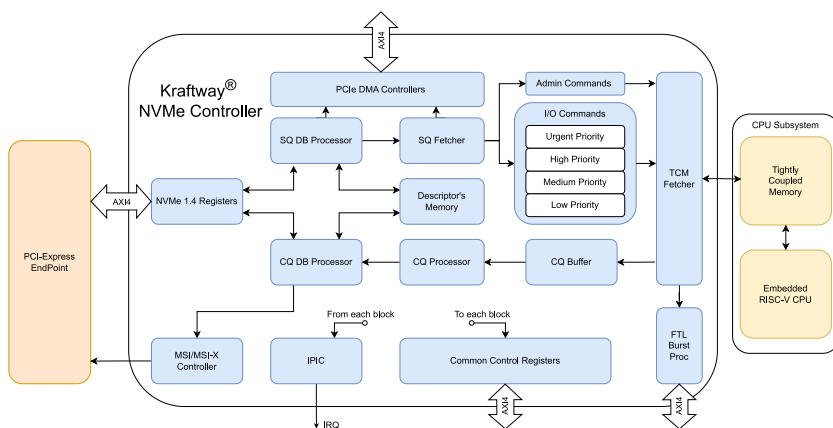


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого NVMe-контроллера

Для минимизации затрат на операции взаимодействия процессора с периферийными блоками реализована система автоматической передачи и поддержания актуального состояния всей необходимой для полноценной обработки NVMe команд информации напрямую в плотносопряженную память процессора. Данное решение позволяет увеличить чистую производительность более чем на 100 % только за счет минимизации времени на взаимодействие процессора с системной шиной AXI4 и отправкой транзакций.

Заключение

Благодаря использованию решений, представленных в работе, и особенностей увеличения быстродействия удалось достичь производительности устройства порядка 100000 операций ввода-вывода в секунду при рабочей частоте 100 МГц, что соответствует скорости передачи данных порядка 400 Мбайт/с при работе с пакетами стандартного размера (4 Кбайта). Для целевой технологии уровня 28 нм занимаемая подсистемой площадь оценивается в 0,74 мм².

Литература

1. Тищук Б. Ю. Исследование влияния реконфигурации системы команд на микроархитектуру RISC-V процессоров // Сборник трудов X Конгресса молодых ученых: материалы Конгресса, Санкт-Петербург, 14–17 апреля 2021 года. Том 1. — Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2021. — С. 249–252.
2. Qiu Y., Yin W. and Wang L. A High-Performance and Scalable NVMe Controller Featuring Hardware Acceleration // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022. Vol. 41. № 5. P. 1344–1357. DOI: 10.1109/TCAD.2021.3088784.
3. NVM Express™ Base Specification Revision 1.4a // NVM Express, Inc., 2020. 405 p.

УДК 004.087.2

Разработка высокопроизводительного контроллера NAND-памяти с программируемой системой команд интерфейса ONFI/Toggle

Любавин К. Д.^{1,2}¹ АО «Крафтвэй Корпорэйшн ПЛС»

129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16, стр. 60

klyubavin@kraftway.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлен набор конструктивных решений, использованных в процессе разработки СФ-блока высокопроизводительного контроллера NAND-памяти с программируемой системой команд управления NAND-массивом с использованием интерфейса ONFI/Toggle. Описаны особенности разработки блока, структурная схема и его оценочная производительность.

Ключевые слова: NAND-память; флеш-память; ONFI; Toggle; контроллер памяти; ТНИ; твердотельные накопители информации; высокопроизводительные SSD.

Введение

В связи с бурным темпом развития сфер и устройств, связанных с хранением и передачей информации, спрос на твердотельные накопители информации (ТНИ, SSD) на базе энергонезависимой флеш-памяти постоянно увеличивается. В то же время можно наблюдать противоположную тенденцию, наблюдаемую на рынке жестких дисков (ЖД, HDD). В настоящий момент накопители на базе флеш-памяти повсеместно используются в смартфонах, ПК, системах хранения данных (СХД) и т. д. Требования к данным классам устройств постоянно увеличиваются. К таким требованиям относятся: скорость передачи данных, производительность, объем данных на единицу площади устройства, общий объем накопителей и энергопотребление. В отличие от встроенных в чип энергонезависимых типов памяти (EEPROM, ReRAM и т. д.), NAND Flash представлены в виде отдельных внешних изделий и обладают объемом памяти, который превосходит объем встроенных типов памяти на несколько порядков [1]. Однако это приводит к увеличению сложности, стоимости и времени разработки контроллеров памяти. Сотрудниками АО «Крафтвэй Корпорэйшн ПЛС» активно проводятся исследования на тему разработки как высокопроизводительных контроллеров NAND-памяти, так и полноценных устройств ТНИ. Актуальность данной работы заключается в исследовании и разработке универсального высокопроизводительного контроллера NAND-памяти с программируемым набором команд интерфейса ONFI/ Toggle для использования в составе контроллеров ТНИ.

Особенности разработки универсального контроллера NAND-памяти

На данный момент существует несколько производителей NAND флеш-памяти, каждый из которых обладает уникальными особенностями в системе команд либо типе используемого интерфейса (ONFI или Toggle). Также у каждого производителя есть свои архитектурные особенности строения модулей памяти. К таким архитектурным особенностям можно отнести как различную адресацию до внутренних

узлов памяти, поддержку различных режимов работы с памятью, так и наличие или отсутствие встроенных скремблирующих или дескремблирующих кодеков обработки информации. Вышеперечисленные особенности NAND-памяти различных вендоров приводят к необходимости разработки СФ-блока универсального контроллера NAND-памяти (рис. 1).

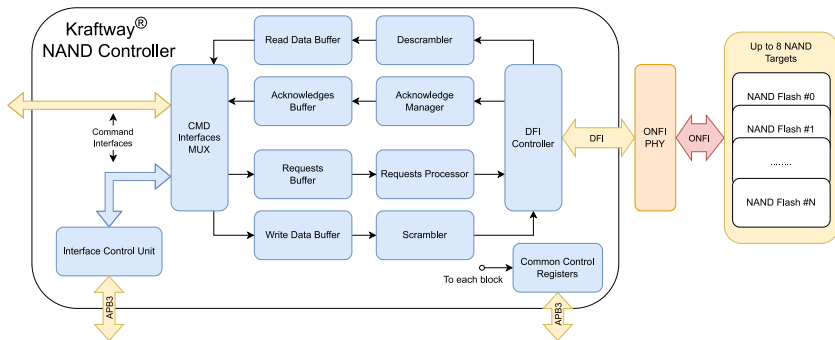


Рис. 1. Структурная схема разработанного устройства

К особенностям разработанного СФ-блока контроллера NAND-памяти относятся:

- совместимость с интерфейсами ONFI 4.1 / Toggle 3.0;
- поддержка режимов SDR, NVDDR2/3, ToggleNAND;
- наличие программно-конфигурируемых кодеков скремблирования/дескремблирования данных;
- система проприетарных инструкций (микрокод, ucode) для гибкой конфигурации каждой команды взаимодействия с NAND-памятью;
- отладочный модуль Interface Control Unit (ICU), имитирующий обращения по проприетарному интерфейсу, что позволяет производить отладку команд через внешнюю системную шину AMBA APB3;
- поддержка до восьми каналов NAND-памяти на контроллер (CE/RB Reduction);
- поддержка MultiLUN-, MultiPLANE-операций.

Система микрокода поддерживает механизмы стека, условий, косвенных и безусловных переходов и базовых логических операций. Благодаря реализации данных механизмов и конвейеризации большинства процессов производительность устройства практически не влияет на производительность ONFI/Toggle интерфейса.

Заключение

В работе описаны особенности разработки универсальных контрольных NAND-памяти, приведена структурная схема и описаны функциональные возможности устройства. Производительность разработанного СФ-блока оценивается в 366 Мбайт/с при рабочей частоте контроллера 100 МГц и частоте ONFI/Toggle-интерфейса 200 МГц. Для целевой технологии 28 нм занимаемая устройством площадь оценивается в 0,14 мм².

Литература

1. Ермаков И. В., Нуикин А. В., Шелепин Н. А. Разработка IP-блоков EEPROM на основе стандартных КМОП-техпроцессов с одним поликремнием // На-ноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5–2 (102). — С. 311–313. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.311.313. — EDN BTYLHQ.

УДК 004.1

Процессорные ядра RISC-V с поддержкой Linux**Козлов А. В.***ООО «Клаудбеар»**196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, 18, литер 3**alexander.kozlov@cloudbear.ru*

Представлены процессорные СФ-блоки на базе системы команд RISC-V с поддержкой операционной системы Linux, рассмотрены основные микроархитектурные решения и функциональные характеристики, приведены результаты тестов производительности и физической имплементации.

Ключевые слова: RISC-V; процессоры; Linux; СФ-блоки.

В последние несколько лет активно развивается процессорная экосистема RISC-V. RISC-V является открытой процессорной архитектурой с возможностью расширения для широкого спектра применений. RISC-V — это универсальная архитектура, на базе которой могут строиться как встраиваемые, так и высокопроизводительные системы.

Компания «Клаудбеар» (CloudBEAR) работает над линейкой процессорных СФ-блоков различного класса для систем на кристалле с 2015 года. Данный доклад будет посвящен процессорным ядрам с поддержкой операционной системы Linux и процессорным комплексам на их основе. Будут представлены процессорные ядра VI-651 с последовательным исполнением команд и VI-671 с внеочередным исполнением команд. Будет рассмотрена микроархитектура данных ядер, а также их функциональные возможности. Представлены данные тестов производительности, таких как Dhrystone, Coremark, Whetstone, SPEC2006/2017, в сравнении с отечественными и иностранными процессорами схожего класса. Также будут продемонстрированы данные физической имплементации ядер для различных техпроцессов и условий, выполненные как компанией CloudBEAR, так и ее заказчиками.

УДК 004.3'124

Система двухфазного охлаждения микроэлектроники**Французов М. С., Комратов Д. В., Кукшинов Н. В., Хлопов А. Д., Авдеев Г. А.***МГТУ им. Н. Э. Баумана**105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1**frantsuzov@bmstu.ru*

Представлены результаты разработки образцов охлаждения микроэлектроники с помощью погружного прямого двухфазного метода. Приведено описание принципа охлаждения и характеристики разработанных действующих комплексов с установленными микропроцессорами как зарубежного, так и отечественного производства. Показана принципиальная возможность реализации процесса охлаждения с помощью фазового перехода диэлектрической жидкости. Отмечена возможность снижения энергопотребления на охлаждение до уровня в 1–5%. Система позволяет изготавливать более нагруженные вычислительные решения в одной стойке, а также изготавливать более плотные по размещению микропроцессоров платы без риска перегрева компонент микроэлектроники.

Ключевые слова: микроэлектроника; двухфазное охлаждение; погружное охлаждение; «Эльбрус»; ЦОД.

Выделение тепла является неизбежным побочным продуктом любого электронного устройства и обычно отрицательно сказывается на производительности и надежности. Тенденция к увеличению плотности расположения транзисторов при общем уменьшении размеров и повышении производительности процессоров нового поколения приводит к экспоненциальному увеличению энергопотребления системы. С увеличением энергопотребления электрических систем также пропорционально растет и их тепловыделение. Так, плотность теплового потока в современных дата-центрах может достигать величин порядка 150 Вт/см².

Отдельно следует отметить, что весьма важным аспектом является определение величины затрат на охлаждение высокопроизводительной электроники в общей структуре всего энергопотребления системы. Так, для типичного центра обработки данных (ЦОД) примерно 52% электроэнергии используется вычислительным оборудованием, а 48% — вспомогательными системами. При этом в структуре вспомогательных систем затраты на охлаждение составляют порядка 79% или 38% от общих. Таким образом, система охлаждения высокопроизводительной электроники должна не только справляться с заданным уровнем тепловыделения в системе, но и отвечать требованиям к минимизации отношения собственного потребления электроэнергии к общей структуре затрат.

Традиционно для охлаждения высокопроизводительной электроники применяется воздушное охлаждение. Все чаще реализуются системы водяного однофазного охлаждения, когда теплоноситель — вода — отбирает тепло от расположенных на электронике радиаторов. Подобные системы имеют ряд преимуществ перед воздушным. Так, например, для водяной системы охлаждения нет необходимости в кондиционировании и очистке воздуха помещения суперкомпьютера, незначительно сокращается объем, занимаемый системой охлаждения внутри суперкомпьютера.

Однако и водяные системы не лишены недостатков. Для реализации такого охлаждения требуется фильтрация и прокачка теплоносителя, необходим подвод инженерных систем, более трудоемкое обслуживание системы охлаждения, в случае неисправности системы велика вероятность выхода из строя дорогостоящего оборудования суперкомпьютера и возникает необходимость в установке систем сброса тепла теплоносителя вне помещения суперкомпьютера. При этом разработчикам необходимо на каждый квадратный метр помещений уместить больше вычислительной мощности, а значит, увеличится и удельное выделение тепла.

Сравнительный анализ эффективного коэффициента теплоотдачи при различных способах охлаждения электроники показывает, что наилучшими являются методы на основе охлаждения с помощью фазового перехода, при котором возможно достичь уровня затрат электроэнергии на охлаждение в 1–5 % от общего потребления вычислительного оборудования. Существенно снижаются габариты систем охлаждения непосредственно на вычислительном оборудовании, т. к. отсутствует необходимость в установке радиаторов, как при применении воздушного или водяного охлаждения.

Зарубежные компании также ведут разработки в области двухфазного охлаждения, однако на мировой рынок в общий доступ системы не предоставляются, а информация о разработках публикуется лишь в незначительном количестве. Так, компания Gigabyte в 2021 году представила первый опытный образец. В том же году компания Intel сообщила о наличии разработок в данном направлении.

Для демонстрации технологии двухфазного охлаждения разработаны и изготовлены три образца с различными габаритными размерами и количеством размещаемого вычислительного оборудования. Первый образец представляет собой стойку с размерами 900×900×1200 мм, в которой размещен вычислительный узел в герметичной полости. В полости залита диэлектрическая жидкость. То есть сервер погружен в жидкость, а охлаждение осуществляется за счет кипения жидкости на нагретых элементах — процессорах, чипах и прочем. Пар поднимается вверх и конденсируется на теплообменном аппарате, через который прокачивается вода. Капли стекают в жидкую фазу и снова участвуют в охлаждении. В данном образце все необходимые инженерные узлы и агрегаты размещены компактно в одной стойке.

Второй образец — портативный или настольный сервер с размерами 800×800×200 мм. В герметичной емкости расположена плата отечественного производителя АО «МЦСТ» с микропроцессорами «Эльбрус» и четыре нейроускорителя НТЦ «Модуль». При этом охлаждение выполнено еще более компактным способом, как и в первом образце, — с помощью диэлектрической жидкости.

Третий образец — серверная стойка размерами 900×900×1100 мм с возможностью установки двенадцати серверных плат. В образце использованы платы АО «МЦСТ» и карты НТЦ «Модуль», а также установлены отечественные твердотельные жесткие диски. Как и для предыдущих образцов, охлаждение осуществляется с помощью диэлектрической жидкости, которая залита в раздельные герметичные емкости. Инженерная система располагается рядом в отдельной стойке с размерами 900×900×1100 мм, но может быть заменена на подводящие трассы существующих систем ЦОД.

В результате при разработке образцов показано следующее:

- зафиксирован максимальный отводимый тепловой поток на уровне 300 кВт/м^3 , что невозможно достичь любыми другими способами охлаждения;
- потребление электроэнергии на охлаждение снижено с 30 до 5% по сравнению с воздушным охлаждением;
- полностью отсутствует шум системы;
- увеличена плотность вычислительного оборудования на кв. метр с 6 до 9 кВт;
- проведена интеграция 4-процессорной платы с микропроцессорами «Эльбрус» с четырьмя нейроускорителями НТЦ «Модуль» и проведен тест производительности.

УДК 004.384, 004.4'236

Отечественные управляющие вычислительные комплексы и программное обеспечение для АСУ ТП

Глухов А. В.*ПАО «ИНЭУМ им И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24**glukhov_a@ineum.ru*

В статье рассматриваются разработанные в ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» управляющие вычислительные комплексы и устройства на отечественной и совместимой импортной электронно-компонентной базе для применения в АСУ ТП, а также разработанное инструментальное программное обеспечение для программирования и визуализации технологических процессов.

Ключевые слова: отечественный ПЛК; отечественная система программирования ПЛК; платформа «Эльбрус».

За последние 5–7 лет коллективом ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» разработана линейка вычислительных комплексов для применения в АСУ ТП на базе отечественных и доступных к приобретению импортных микропроцессоров. Линейка включает в себя: промышленные компьютеры, встраиваемые модули различных форм-факторов, программируемые логические контроллеры, интеллектуальные шлюзы, промышленные серверы, рабочие места операторов, стойки сбора и обработки данных. В изделиях применяются преимущественно микропроцессоры архитектуры «Эльбрус». Для экспортных поставок выпускаются аналогичные исполнения на базе микропроцессоров с архитектурой x86_64 и ARM.

Особое место занимает программируемый логический контроллер («ПЛК-Эльбрус»). Контроллер имеет модульную архитектуру с жестким монтажным каркасом. Поддерживает «горячую» замену всех модулей, имеет резервированный системный интерфейс, резервированный модуль процессора, резервированную систему питания. Программное обеспечение поддерживает онлайн-замену управляющей программы. Для контроллера разработана широкая линейка модулей ввода-вывода для подключения датчиков и исполнительных механизмов. Линейка активно пополняется новыми изделиями. Разработано четыре типа модулей процессора на базе микропроцессоров «Эльбрус», а также нескольких микропроцессоров с архитектурой ARM. ПЛК имеет действующий сертификат функциональной безопасности по уровню УПБ-2. Получен сертификат об утверждении типа средства измерения.

Для программирования «ПЛК-Эльбрус» разработан и совершенствуется инструментальный комплекс ELPLC-LOGIC, представляющий собой систему программирования на языках стандарта МЭК-61131-3. Поддерживаются следующие языки: ST, FBD, SFC, LD. Разработка выполнена для ряда аппаратных архитектур, что позволяет применять систему программирования на всей линейке выпускаемых устройств с архитектурой «Эльбрус», ARM, x86_64, работающих под управлением операционных систем с ядром Linux. Среда разработки при этом доступна для ОС «Эльбрус», Linux, Windows, MacOS. Также система программирования успешно портируется и применяется на оборудовании сторонних производителей.

Для визуализации технологических процессов также разработан программный комплекс, оптимизированный с точки зрения производительности под платформу «Эльбрус», что позволяет совместно с САПР EPLC-LOGIC применять эти решения в роли SCADA-системы.

Программно-аппаратные комплексы серийно выпускаются и поставляются на объекты атомной промышленности. В настоящий момент ведется апробация решений на объектах ТЭК, металлургии и в других отраслях промышленности.

УДК 004.052

Организация системы тестирования программного обеспечения для платформы «Эльбрус»

Молчанов И. А.¹, Михайлова И. А.²¹ *Московский физико-технический институт (МФТИ)**117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1**Igor.A.Molchanov@mcst.ru*² *ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24**Irina.A.Mikhaylova@ineum.ru*

В статье рассмотрена созданная при участии ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», АО «МЦСТ» и МФТИ система тестирования программного обеспечения, применяемая в развитии программной экосистемы для платформы «Эльбрус» и в популяризации данной платформы, а также описаны результаты ее внедрения.

Ключевые слова: платформа «Эльбрус»; свободное ПО; тестирование ПО.

В настоящее время разработка программного обеспечения для аппаратных платформ, отличных от x86_64, в частности портирование дистрибутивов Linux на такие платформы, сопряжено со значительными сложностями, связанными с отсутствием достаточного количества разработчиков у мэйнтейнеров дистрибутивов и общей нерентабельности in-house-разработки. В связи с этим в сообществе свободного программного обеспечения (FOSS) большинство усилий по портированию исходит не от мэйнтейнеров дистрибутива (как обычно происходит с отечественными дистрибутивами — ОС «Эльбрус-Линукс», Astra Linux Leningrad, Alt Linux), а от энтузиастов. С целью задействовать эти усилия, в частности усилия группы разработчиков «OpenE2K» и других заинтересованных лиц, была построена система, позволяющая им заниматься этой деятельностью.

Система разработана на базе серверной стойки, включающей на данный момент четыре сервера на основе процессоров «Эльбрус-8С» (два сервера), «Эльбрус-8СВ» и «Эльбрус-2С+», с планами дальнейшего добавления в стойку серверов на основе процессоров «Эльбрус-4С», «Эльбрус-2С3» и «Эльбрус-16С», а также комплекса программного обеспечения Nemino, разработанного Молчановым И. А.

Комплекс Nemino включает в себя форму запроса доступа в виде PHP-страницы, размещенной на веб-сайте, Telegram-бота для диалога с администратором серверной стойки и ее пользователями, Cron-сценариев для индикации доступности сервера и скрипта для создания аккаунта пользователя. Помимо основного назначения, Nemino позволяет пользователям проверять, обработан ли их запрос (как на сайте, так и через Telegram-бота), отображать uptime и доступность серверов, автоматически посылать оповещения в Discord и корректно обрабатывать повторные запросы от пользователей на добавление новых серверов. Интерфейс сайта и Telegram-бота двуязычный (английский/русский), что позволяет участвовать в тестировании людям со всего мира.

Комплекс Nemino является свободным программным обеспечением, распространяемым по лицензии MIT, документирован (на английском языке) и легко интегрируется в другие подобные проекты.

В процессе эксплуатации данной системы было выявлено более шести важных уязвимостей в ОС «Эльбрус-Линукс», в том числе одна, позволяющая получать права root, и еще две, упрощающие эксплуатацию других уязвимостей (в настоящий момент все эти уязвимости исправлены). Также было обнаружено более 14 ошибок в компиляторе, ядре ОС и прикладном ПО, в том числе браузере Firefox, про которые было сообщено разработчикам данных компонентов (и значительное число тех, которые были решены без привлечения АО «МЦСТ» и ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» усилиями пользователей стойки). Кроме того, портировано значительное количество свободного и открытого ПО, не входящего в дистрибутив, а изменения исходного кода, полученные в результате этой работы, отправлены в upstream. Это для конечных пользователей платформы «Эльбрус» облегчит использование данного ПО в будущем.

Система в данный момент функционирует и доступна любому желающему, также существуют группы поддержки пользователей этой системы в виде конференции в Telegram и сервера Discord.

При поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 г., проект № FSMG-2022-0033

УДК 004.71

Программируемый отечественный маршрутизатор на ПЛИС с производительностью терабитного уровня

Елизаров С. Г.¹, Гончаров С. В.¹, Попов А. А.¹, Лукьянченко Г. А.¹,
Монахов А. М.¹, Лукин К. И.²

¹ ООО «Мальт Систем»

119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

info@maltsystem.com

² ОАО «Супертел»

197101, г. Санкт-Петербург, Петроградская наб., 38 А

В докладе обсуждается архитектура высокопроизводительных программируемых маршрутизаторов на базе ПЛИС. Обосновано применение высокоуровневого языка P4 как средства описания правил управления трафиком, обсуждаются способы поддержки протоколов уровней 2–4 модели OSI. В докладе приведены оценки скорости обработки пакетов в таком сетевом устройстве.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети; ПЛИС; сетевой маршрутизатор.

Программируемый маршрутизатор представляет собой сложное устройство, состоящее из компонентов, выполняющих функции обмена информацией с уровнем управления, передачи информации и управляющих команд внутри устройства, поиска точных или маскированных значений, исполнения правил обработки и фильтрации пакетов. Центральным и наиболее сложным блоком в dataplane является высокоскоростной тракт обработки заголовков сетевых пакетов, который должен позволять использовать для определения правил обработки и фильтрации как высокоуровневые языки, например P4, так и языки низкого уровня — ASM или C-подобные. При этом, независимо от выполняемой ветви кода, необходимо сохранять неизменным время обработки пакета, что накладывает дополнительные требования как на компилятор, так и на тракт обработки заголовков пакетов для всех программ, прошедших верификацию времени исполнения. Выбирая производительность отдельного тракта обработки заголовков пакетов, например на уровне 10 Гбит/с, путем параллельного масштабирования возможно построить семейство маршрутизаторов на ПЛИС с производительностью терабитного уровня.

Для реализации возможности управления с помощью языка P4 нами создан компилятор, учитывающий особенности аппаратного исполнения и выполняющий ряд оптимизаций на этапе представления кода в одном из промежуточных видов — C или LLVM IR. Наиболее гибкие возможности оптимизации дает представление LLVM IR, здесь доступны точная оценка количества инструкций в каждом пути прохождения кода, перестановка инструкций для уплотнения кода. Важным параметром такого компилятора является скорость подготовки двоичного файла программы — верификации, оптимизации и загрузки, нам удалось снизить эту цифру до 150 мс.

Также нами разработан эмулятор высокоскоростного тракта для исполнения и отладки программ с использованием стандартного отладчика GDB, что позволяет применять привычные для разработчиков средства отладки и отслеживать состояние регистров и памяти в процессе отладки. Входными данными для эмулятора

является набор пакетов в файле формата .рсар и двоичный файл исполняемой программы, выходные данные — файл формата .рсар, содержащий пакеты после прохождения тракта, и образ памяти, содержащий необходимые для отладки данные.

Применение совокупности этих средств позволяет реализовать полный цикл разработки ПО — создание кода, его отладка и исполнение как на эмуляторе, так и на аппаратном прототипе.

Возможность программной конфигурации тракта дает гибкость и полный контроль над процессом обработки входящих пакетов с помощью определения правил их обработки и фильтрации. Под правилами понимаются выражения вида `value:action`, где `value` — конкретное или маскированное значение поля заголовка. В прототипе возможен анализ полей заголовков уровней 2–4, таких как MAC-адрес, IP-адрес, порты протоколов транспортного уровня и др. При этом состав заголовков не является архитектурным ограничением.

УДК 621.391.31

Последовательный 28 Гб/с NRZ-передатчик с энергоэффективностью 3,2 мВт/Гб/с с квадратурным тактированием по технологии КМОП 28 нм

Ларионов А. В., Бужакова О. Н., Сысоева О. В., Тарасов И. В.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

alar@cs.niisi.ras.ru

Разработан последовательный мультистандартный NRZ-передатчик с квадратурным тактированием, 3-тап FFE-эквайзером и выходным CML-драйвером. Передатчик спроектирован по технологии КМОП 28 нм, работает от напряжения питания 0,9 и 1,0 В, имеет энергоэффективность 3,2 мВт/Гб/с.

Ключевые слова: последовательный передатчик; IDLE; FFE-эквайзер; квадратурное тактирование.

Скорость обработки данных, энергоэффективность и мультистандартность — три ключевые характеристики передатчика. Сравнительный анализ [1–4] показывает, что применение quarter-rate-архитектуры и выходного токового CML-драйвера в высокоскоростных передатчиках позволяет достичь наилучшей энергоэффективности. Передатчик с программируемым FFE- (Feed-Forward Equalizer) эквайзером и драйвером с широким диапазоном перестройки выходного напряжения [1–3] позволяет покрыть большое разнообразие стандартов. Специфика стандартов SATA или PCI Express требует реализовать IDLE-состояние, выходной синфазный сигнал. Особенность разработанного передатчика — реализация электрического IDLE-состояния и визуального тестирования без использования дополнительных логических элементов в тракте данных. В передатчике применено квадратурное тактирование, поскольку с использованием quarter-rate-архитектуры требования к временным ограничениям снижаются, что упрощает реализацию передатчика, уменьшает аппаратные издержки.

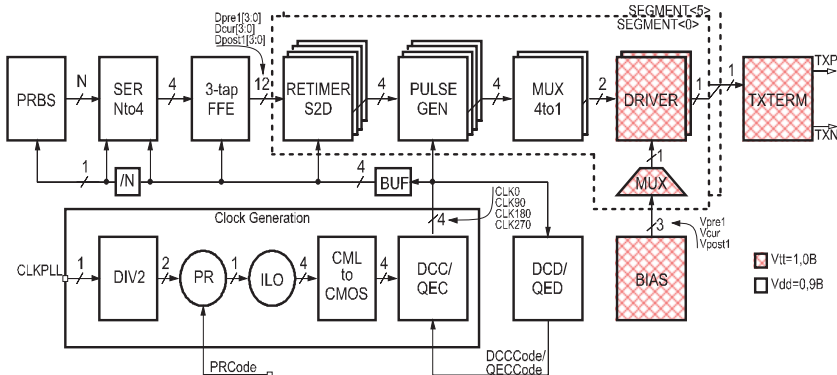


Рис. 1. Структурная схема передатчика

Структурная схема передатчика показана на рис. 1. Передатчик спроектирован по технологии КМОП 28 нм на транзисторах с тонким окислом, работает от напряжений питания 0,9 и 1,0 В и обеспечивает пиковое выходное дифференциальное напряжение $V_{\text{DIFFPPMAX}} = 1$ Впп,

Моделирование передатчика проводилось с экстракцией паразитных параметров после проектирования топологии совместно с моделью корпуса на скорости 28,1 Гб/с. Детерминированный джиттер выходного сигнала не превысил 2,8 пс.

Спроектирован последовательный NRZ-передатчик для электрически коммутационных сред, имеющий широкую область применения, в том числе для интерфейсов CEI-25G-LR, CEI-28G-MR, PCI Express Gen4. Для максимальной скорости передачи 28,1 Гб/с достигнута энергоэффективность 3,2 мВт/Гб/с при потреблении 89 мВт.

*Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0008*

Литература

1. Menolfi C., Hertle J., Toifi T. et al. A 28-Gb/s source-series terminated TX in 32 nm CMOS SOI // IEEE International of Solid-State Circuits Conference, 2012. SES. 19. P. 334–335.
2. Kim J., Balankutty A., Elshazly A. et al. A 16-to-40Gb/s quarter-rate NRZ/PAM4 dual-mode transmitter in 14 nm CMOS // IEEE International of Solid-State Circuits Conference, 2015. SES. 3. P. 60–61.
3. Toprak-Deniz Z., Proesel J., Bulzacchelli J. et al. A 128Gb/s 1.3pJ/b PAM-4 transmitter with reconfigurable 3-tap FFE in 14 nm CMOS // IEEE International of Solid-State Circuits Conference, 2019. SES. 6. P. 122–123.
4. Singh U., Garg A., Raghavan B. et al. A 780 mW 4×28 Gb/s transceiver for 100 Gbe gearbox PHY in 40 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014. Vol. 49. № 12. P. 3116–3129.
5. Chattopadhyay B., Bhat S., Nayak G. et al. A 12.5Gbps transmitter for multi-standard SERDES in 40 nm low leakage CMOS process // IEEE International Conference on VLSI Design, 2018. P. 13–18.

УДК 621.382

Методы снижения энергопотребления СФ-блоков высокоскоростных АЦП

Руткевич А. В.*АО «НПП «Цифровые решения»**111250, г. Москва, проезд Завода Серп и Молот, 10**mail@dsol.ru*

Представлены результаты разработки СФ-блоков высокоскоростных конвейерных АЦП. Рассмотрены используемые методы снижения энергопотребления блоков АЦП, вопросы калибровки и коррекции результатов преобразования, представлены результаты практического применения блоков в составе СБИС.

Ключевые слова: АЦП; СФ-блок; фоновая калибровка.

Введение

Современные тенденции развития микроэлектроники ставят задачи интеграции блоков АЦП в составе систем на кристалле, на которых реализуется практически весь функционал конечного изделия. Такое решение позволяет существенно улучшить характеристики, при этом появляется необходимость разработки блоков АЦП для типовых КМОП-процессов, что является довольно трудоемкой задачей.

Развитие типовых КМОП-технологических процессов, ориентированных на цифровые схемы, приводит к улучшению их характеристик в части цифровых схем (увеличение производительности, снижение энергопотребления и стоимости), но при этом происходит ухудшение параметров транзисторов, важных для АЦП (сужается динамический диапазон, падает коэффициент усиления, снижается линейность). Использование традиционных подходов в проектировании аналоговых блоков значительно усложняет их, требует увеличения рабочих токов и в конечном итоге энергопотребления, использования механизмов подстройки параметров в процессе производства, что не позволяет создать конкурентоспособный блок или достичь характеристик отдельных микросхем АЦП.

Цифровая фоновая коррекция

При построении АЦП оптимальным является использование цифровой коррекции результатов аналого-цифрового преобразования, компенсирующих неточность работы аналоговой части. В этом случае в АЦП можно выделить три функциональных части:

- аналого-цифровой преобразователь;
- блок цифровой коррекции данных;
- блок оценки параметров аналого-цифрового преобразователя.

В зависимости от реализации блока оценки параметров калибровка может проводиться параллельно с работой АЦП (фоновая калибровка) либо перед началом работы. При реализации фоновой калибровки появляется возможность коррекции не только разброса параметров, вызванных технологическим процессом, но и зависимостей от напряжения и температуры.

СФ-блок АЦП

НПП «Цифровые решения» разработан блок АЦП, имеющий разрядность 14 бит, частоту дискретизации до 400 МГц. Блок имеет конвейерную архитектуру на основе трех стадий 2,5-битных умножающих ЦАП (MDAC) и каскада последовательного приближения. Реализована автоматическая фоновая калибровка каскадов по коэффициентам усиления и сдвигу нуля.

При разработке блока была выполнена оптимизация энергопотребления каскадов MDAC, использованы псевдодифференциальные стробируемые компараторы.

По результатам измерения тестовых кристаллов достигнуто значение эффективной разрядности (ENOB) более 9,5 разрядов при целевом значении в 10,5 разрядов. Энергопотребление блока составляет менее 250 мВт, площадь — 0,65 мм².

Заключение

Разработанный СФ-блок используется при разработке микросхемы многоканального аналого-цифрового интерфейса, востребованной в широком спектре радиоэлектронной аппаратуры. Полученные результаты исследований подтверждают правильность выбранных решений и возможность достижения целевых показателей.

УДК 004.27

Перспективы использования квантовых сопроцессоров в высокопроизводительных вычислительных комплексах

Кирилюк М. А.^{1,2}¹ ПАО «ИНЭУМ им И. С. Брука»

119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

mkiriliouk@mail.ru

В данной работе представлен разработанный моделирующий стенд для оценки эффективности решения вычислительно сложных задач с помощью квантовых компьютеров. С помощью моделирующего стенда показано потенциальное повышение эффективности ряда вычислительно сложных задач, таких как задача коммивояжера, машинное обучение и анализ данных.

Ключевые слова: квантовые вычисления; квантовый компьютер; сопроцессоры; моделирование.

Несмотря на то что доступные сегодня прототипы квантовых компьютеров ограничены в своей производительности малым числом кубитов и имеют ряд существенных недостатков [1–3], растет интерес к потенциальному использованию квантовых компьютеров в области высокопроизводительных вычислений, область квантовых вычислений продолжает развиваться и на сегодняшний день существует более 50 прототипов квантовых компьютеров, использующих в своей работе различные физические принципы.

На данный момент считается, что квантовые компьютеры, вне зависимости от используемого физического принципа для реализации квантовых вычислений, будут использоваться параллельно с классическими процессорами в качестве сопроцессоров для решения специализированных задач. Это обуславливается ограничениями возможностей ввода-вывода квантовых компьютеров, а также гибридным характером квантовых алгоритмов. Автором был разработан моделирующий стенд для оценки эффективности решения вычислительно сложных задач с помощью квантовых компьютеров. При разработке моделирующего стенда учитывался опыт отечественных и зарубежных разработок в области моделирования квантовых вычислений. Стенд размещен на отечественной аппаратно-программной платформе «Эльбрус» и позволяет выполнять квантовые алгоритмы как в режиме моделирования, так и при помощи подключения удаленных прототипов квантовых компьютеров. С помощью моделирующего стенда было показано потенциальное повышение эффективности ряда задач, таких как планирование маршрутов робототехнических комплексов (ускорение решения задачи коммивояжера до $3 \cdot 10^8$ раз на графе 10^6 узлов), распознавание образов (константное время решения задачи обнаружения границ для произвольного размера изображения), машинное обучение (повышение точности в десятки раз при том же времени обучения), анализ многопараметрических функций (ускорение до 10^5 раз для функции с 10^8 параметрами).

Литература

1. Almudever C. G. et al. The engineering challenges in quantum computing // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, Lausanne, Switzerland, 2017. P. 836–845.
2. Бочаров Н. А., Кирилюк М. А., Парамонов Н. Б. Квантовые вычисления и некоторые сложности их реализации // Приборы, 2021. — № 7 (253). — С. 18–25.
3. Franklin D., Chong F. T. Challenges in Reliable Quantum Computing // Nano, Quantum and Molecular Computing. Springer, Boston, MA. 2004. P. 247–266.

УДК 004.318

Разработка модуля мониторинга производительности для вычислительной системы

Хайдуков Д. И.^{1,2}¹ ПАО «Сбербанк»121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32кА
dikhaydukov@sberbank.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khajdukov.di@phystech.edu

Разработана архитектура модуля мониторинга производительности для вычислительной системы. Модуль поддерживает три режима, исследование минимального периода работы которых при моделировании на уровне регистровых передач подтвердило применимость для современных методов анализа производительности.

Ключевые слова: вычислительная система; мониторинг производительности; счетчики производительности; фиксатор событий.

Существующие реализации аппаратных средств мониторинга производительности не удовлетворяют требованиям современных методов мониторинга [1, 2]. В данных условиях актуальна разработка модуля мониторинга производительности. Новым в работе является подход с использованием независимого интерфейса обращения к счетчикам производительности исполнительных устройств для обеспечения периодического сбора статистики без негативного влияния на производительность и универсального фиксатора событий для отслеживания всех сигналов устройств.

Разработанный модуль мониторинга производительности (рис. 1) состоит из следующих блоков:

- регистровый файл для настройки работы системы пользователем;
- формирователи запросов и пакетов для работы со счетчиками;
- фиксатор событий для обработки сигналов исполнительных устройств;
- контроллер отправки данных, обеспечивающий стабильную пропускную способность.

Представленный модуль поддерживает три режима, минимальная периодичность работы которых была исследована при помощи моделирования на уровне регистровых передач для системы, работающей на частоте 1 ГГц (рис. 2):

- пользовательское чтение счетчиков может производиться с минимальным периодом 10^{-2} сек, что полезно при исследовании продолжительных программ;
- периодическое получение статистики счетчиков осуществляется с минимальным периодом 10^{-7} сек и может быть использовано при анализе больших и объемных программ;
- фиксирование микроархитектурных событий допускает минимальный период обращений 10^{-9} сек при детальном рассмотрении отдельных частей программ.

Оценка минимальной периодичности использования аппаратных средств подтверждает применимость модуля мониторинга производительности в рамках современных методов мониторинга.

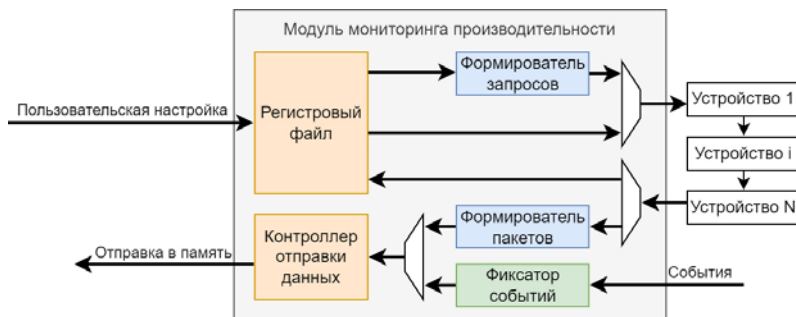


Рис. 1. Схема модуля мониторинга производительности

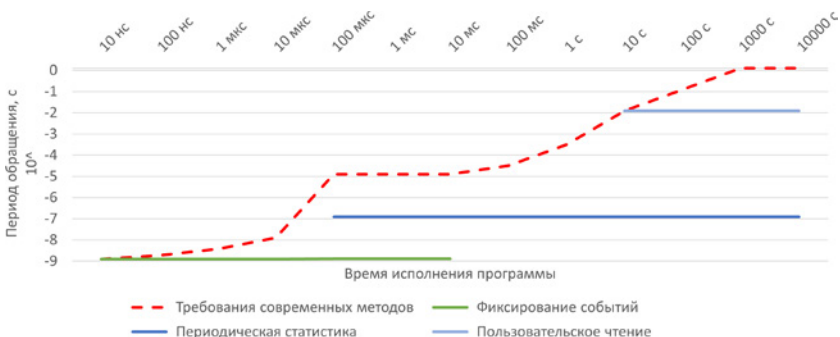


Рис. 2. Период обращения к аппаратным средствам мониторинга производительности

Литература

1. Filipovic J., Hozzova J., Nezarat A., Olha J., Petrovic F. Using hardware performance counters to speed up automating convergence on GPUs // J. Parallel Distributed Comput., 2021. P. 16–35.
2. Moseley T., Vachharajani N., Jalby W. Hardware Performance Monitoring for the Rest of Us: A Position and Survey // ISBN 978-3-642-24402-5. 2011. P. 293–312.

УДК 004.2

Автоматический синтез конвейеризованных аппаратных ускорителей на основе компилятора предметно-ориентированного языка с учетом топологического представления**Тарасов И. Е., Советов П. Н.***МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78*

Рассмотрен подход к автоматизированному синтезу конвейерных вычислительных структур на основе высокоуровневого описания. Использование предметно-ориентированного языка и учет характеристик элементов технологической библиотеки позволяют получать высокопроизводительные конвейерные структуры для ряда алгоритмов.

Ключевые слова: вычислительная система; компилятор; ПЛИС; СБИС; предметно-ориентированный язык.

Введение

В процессе проектирования вычислительных устройств разработчики сталкиваются с жесткими требованиями к их производительности, энергопотреблению, функциональным возможностям, совместимости с инструментальными программным обеспечением и т. п. При этом актуальные требования к импортозамещению ЭКБ и обеспечению технологического суверенитета в области цифровой вычислительной техники обуславливают развитие методик проектирования, позволяющих получать технические решения при наличии ограниченного доступа к технологиям микроэлектроники. Возможным подходом является ориентация на специализированные решения, эффективные в выбранных ключевых областях применения.

Кинетическая схема процесса гетерогенного осаждения

Применение высокоуровневых средств синтеза (HLL, High Level Languages), таких как SystemC и подобные инструменты класса C-to-RTL, предоставляют разработчикам удобный способ быстрого перехода от высокоуровневой (в том числе предметно-ориентированной) модели устройства к ее схематехническому представлению, пригодному как для макетирования в ПЛИС, так и для разработки СБИС. Однако проведенные исследования показали некоторую схематехническую избыточность получаемого таким образом RTL-представления, в том числе по причине поддержки синтезаторами HLL широкого класса управляющих схем. В связи с этим была рассмотрена методика проектирования, основанная на реализации оригинального компилятора предметно-ориентированного C-подобного языка, ограниченного синтезом определенного подкласса вычислительных схем. Такой компилятор был опробован на задачах синтеза конвейеризованных аппаратных ускорителей, предназначенных для работы в составе вычислительных комплексов на базе ПЛИС или СБИС.

Выбор в качестве целевой области конвейеризованных схем ускорителей обусловлен рядом факторов. Прежде всего такая схема допускает гибкое управление характеристиками производительности и энергопотребления за счет выбора соответствующего набора конвейеризирующих регистров. При этом целый ряд

алгоритмов, актуальных в настоящее время, может быть реализован на базе конвейерного вычислителя, работающего в качестве ускорителя совместно с процессором общего назначения. Это расширяет сферу применения подобных устройств. Важной задачей при этом является определение оптимального количества стадий конвейера и распределение комбинационной логики между стадиями для достижения сбалансированных задержек распространения сигналов.

В разработанном подходе синтезатор преобразует исходное описание задачи на языке, являющемся подмножеством C. Ограничениями синтезатора являются сведения о задержках, вносимых отдельными операциями, которые определяются из анализа соответствующих технологических библиотек или на основе численного эксперимента, выполняемого в САПР ПЛИС или СБИС.

Полученные предварительные результаты были экспериментально проверены на ряде конвейерных вычислителей, таких как:

- операции «умножение с накоплением» для целочисленных данных;
- вычисление трансцендентных функций на основе алгоритма CORDIC;
- вычисление хеш-функций на основе алгоритмов «Магма», «Кузнечик», SHA256.

Размещение и трассировка синтезированного представления в ПЛИС AMD/Xilinx в САПР Vivado подтверждает возможность получения тактовых частот, близких к максимальным для выбранных семейств ПЛИС — 333 МГц для Artix-7, 500 МГц и более для Kintex-7, 625 МГц для Zynq UltraScale+ MPSOC.

Заключение

Развитием представленной работы является расширение классов синтезируемых схем (например добавление последовательных операций на одних и тех же стадиях конвейера), а также адаптация к технологическим библиотекам, поддерживаемым российскими производителями СБИС.

УДК 004.415.2

Создание эффективных вычислительных комплексов для топологического проектирования

Федоткин А. С.¹, Лобанова А. Г.²¹ ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

fedotkin_a@ineum.ru

² Московский физико-технический институт (МФТИ)

117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

lobanova.ag@mipt.ru

Представлены конфигурации вычислительных комплексов для выполнения задач топологического проектирования корпусов сложнофункциональных микросхем. В зависимости от сложности проектов и режимов их выполнения определены необходимые характеристики для подсистем вычислительных комплексов.

Ключевые слова: вычислительные комплексы; гетерогенные вычисления; проектирование топологии.

При проектировании топологии в проектах корпусов сложнофункциональных микросхем определены следующие задачи, выполнение которых требует высокой производительности [1]:

- визуализация проекта без видимых пользователю задержек графического интерфейса;
- проверка правил проектирования и электрических ограничений в реальном времени.

Визуализация проекта в реальном времени требует выполнения большого количества геометрических преобразований и растеризации сложных геометрических объектов. Проверка правил проектирования и электрических ограничений при интерактивном размещении и трассировки требует большого количества расчетов для разных слоев, расстояний, зазоров и пересечений между изменяющимися элементами топологии, а также расчетов размеров этих элементов в области видимости проекта.

По результатам наблюдений выполнение вычислений только на центральном многоядерном процессоре вычислительного комплекса не позволяет без видимых пользователю задержек выполнить требуемые задачи для проектов топологий, которые содержат более миллиона элементов или соответствующих им графических примитивов. При реализованных методах в программных средствах проектирования, которые задействуют как ядра центрального процессора, так и ядра графических ускорителей, можно эффективно решить задачи проектирования, выполнение которых требует высокой производительности вычислительного комплекса.

В зависимости от сложности проектов топологии, однопользовательского или многопользовательского режима разработки опытным путем подобраны конфигурации аппаратуры эффективных вычислительных комплексов на основе центральных процессоров платформы «Эльбрус» [2] и x86-64. Проработанные с учетом себестоимости аппаратуры конфигурации эффективных вычислительных комплексов

для выполнения задач топологического проектирования на примере проектов корпусов сложнотехнологических микросхем представлены в табл. 1.

Таблица 1. Примеры конфигураций созданных вычислительных комплексов

Назначение	Характеристики вычислительного комплекса
Однопользовательская станция для проектирования корпусов до 2000 выводов (300 тыс. граф. примитивов) напр., контроллер ввода-вывода, одноядерный процессор	ЦП: 2–6 ядер (напр., AMD Ryzen 5600X, «Эльбрус Е2С3»); ОЗУ: 16 ГБ; видеокарта: 1024 ядра, 4 ГБ (напр., Radeon RX 6500 XT)
Однопользовательская станция для проектирования корпусов с более 2000 выводов (напр., 8-, 16-ядерный ЦП)	ЦП: 8–16 ядер (напр., AMD Ryzen 5950X, 5950X, «Эльбрус Е8С», Е8СВ); ОЗУ: 32–128 ГБ; видеокарта: 2560–5120 ядра, 1 ГБ
Многопользовательский сервер	Процессор: 8–64 ядер; ОЗУ: 128–2048 ГБ; две видеокарты: 5120 ядра, 16 ГБ (напр., Radeon RX 6950 XT)

При поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 г., проект № FSMG-2022-0033

Литература

1. Бычков И. Н., Ломако С. Г. САПР проектирования коммутационных плат корпусов // Наноиндустрия, 2019. — № 89 (специальный выпуск). — С. 57–59.
2. Бычков И. Н., Лобанов И. Н., Молчанов И. А. Вычислительная техника на основе аппаратно-программной платформы «Эльбрус» для перспективных информационных систем // Приборы, 2018. — № 8 (218). — С. 14–20.

УДК 004.318

Анализ эффективности схем компрессии данных для подсистемы памяти процессора

Недбайло Ю. А.¹, Сурченко А. В.²¹ ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

nonsens@mcst.ru

² АО «МЦСТ»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 51

surchenko_a@mcst.ru

На примере модели процессора «Эльбрус-16С» для задач SPEC CPU2017 вычисляется доля данных, сжимаемых по каждой из схем компрессии алгоритма VDI*-HL, определяются наиболее эффективные схемы. Оценивается потенциал «облегченной» версии алгоритма с меньшим числом схем компрессии.

Ключевые слова: архитектура процессора; подсистема памяти; общий кеш; сеть на кристалле; компрессия данных; симулятор.

Растущее число ядер в современных высокопроизводительных процессорах общего назначения требует увеличения пропускной способности подсистемы памяти для своевременной обработки поступающих от ядер запросов. Аппаратная компрессия данных позволит уменьшить нагрузку на подсистему памяти, во-первых, снижая число обращений в оперативную память за счет увеличения эффективного объема кеш-памяти, а во-вторых, уменьшая объем трафика данных.

Алгоритм VDI*-HL является модификацией алгоритма VDI [1], доработанной для удобства аппаратной реализации. Его применение способно повысить эффективность работы подсистемы памяти и всего процессора в целом [2].

Принцип работы VDI*-HL, как и VDI, основан на часто встречающемся в пределах кеш-строк слабом различии в значениях хранящихся в них данных. Такие данные могут иметь разный размер в зависимости от типа переменной, используемой программистом для их хранения. В связи с этим алгоритмы рассматривают несколько схем компрессии, отличающихся размерами сегментов (определяют размер данных, значение которых сравнивается) и «дельта» (определяют максимальную допустимую разницу в значениях, при которых компрессия считается успешной).

Список схем компрессии алгоритма VDI*-HL был переработан по сравнению с VDI, т. к. в VDI*-HL конечный размер сжатой кеш-строки определяется с точностью до половины кеш-строки [3]. При отборе схем компрессии на каждый размер сегмента было выделено по одной схеме компрессии, такой, что размер сжатых данных не превышает половины размера кеш-строки (схемы компрессии Base2-Δ1, Base4-Δ1, Base8-Δ3 и Base16-Δ4). В качестве схем компрессии также были выбраны компрессия нулевых строк (Zero values) и компрессия строк, где нулевой является одна из половин (Half0/1 Zero).

На потактовой модели процессора «Эльбрус-16С» для задач пакета SPEC CPU2017 была оценена доля сжимаемых строк для каждого сочетания приведенных семи схем компрессии при использовании алгоритма VDI*-HL в кеш-памяти последнего уровня (L3) и сети на кристалле (OCN). Результаты для каждой отдельной



схемы представлены на рис. 1. При работе всех схем компрессии общая доля сжатых строк составила 8,7% для сети на кристалле и 21,2% для кеш-памяти.

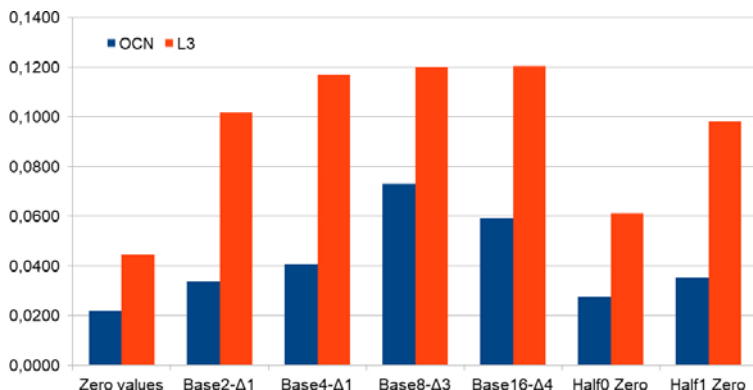


Рис. 1. Доля сжимаемых строк по схемам компрессии алгоритма VΔ1*-HL

В ходе исследования также оценен потенциал «облегченной» версии алгоритма, задействующей три схемы компрессии и два бита для хранения номера схемы. Ее использование может сократить задержки на компрессию и декомпрессию при наличии более строгих условий по таймингу, а также уменьшить требуемый объем аппаратуры.

Для выбора двух схем произведена оценка доли сжатых строк при отдельной работе каждой из пар схем компрессии. Наибольшую долю сжатых строк продемонстрировало сочетание схем <Base4-Δ1, Base8-Δ3>, при этом общая доля сжатых строк составила 8,0% для сети на кристалле и 17,5% для кеш-памяти. В качестве третьей схемы была выбрана схема Zero values, т.к. компрессия нулевых кеш-строк позволяет не хранить их в кеш-памяти и передавать по сети, тогда как остальные схемы лишь уменьшают размер строки вдвое. В результате работы трех выбранных схем «облегченный» вариант алгоритма обеспечивает 93% эффекта относительно «полного» в сети на кристалле (5,1% сжатия против 5,5%) и 85% эффекта в кеш-памяти (11,0% против 12,8%), что представляется адекватным компромиссом.

Литература

1. Pekhimenko G. et al. Base-delta-immediate compression: Practical data compression for on-chip caches // Proceedings of the 21st international conference on Parallel architectures and compilation techniques, 2012. P. 377–388.
2. Недбайло Ю.А., Сурченко А.В., Бычков И.Н. Снижение частоты промахов в неинклюзивный кэш с инклюзивным справочником многоядерного процессора // Компьютерные исследования и моделирование, 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 639–656.
3. Kozhin A. S., Surchenko A. V. Design of Data Compression Mechanism in Cache Memory of Elbrus Processors // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). IEEE, 2020. P. 1–5.

УДК 538.91

Применение имитационного моделирования микропроцессора для оптимизации архитектуры подсистем памяти

Гревцев Н. А., Зубковский П. С., к. т. н. Чибисов П. А.*ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН**117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1**ngrevcev@cs.niisi.ras.ru*

Имитационное моделирование — инструмент для оценки принимаемых решений и составления плана развития микроархитектуры. Его применение позволяет проверять архитектурные гипотезы на ранних этапах, так как для получения результатов не требуются длительные этапы разработки и верификации RTL-проекта.

Ключевые слова: организация кеш-памяти; эмулятор; имитационное моделирование; тесты производительности.

Введение

Поскольку требования по производительности микропроцессора растут быстрее, чем производительность памяти, то подход к проектированию подсистемы памяти становится определяющим фактором оптимизации производительности всей системы. Эффективная многоуровневая кеш-память имеет решающее значение для производительности подсистемы памяти, так как количество обращений к памяти уменьшается, а также сокращается время простоя процессора в ожидании данных. Средства имитационного моделирования архитектуры микропроцессора позволяют оценивать влияние новых идей, вносимых разработчиками на микроархитектурном уровне, на производительность системы в целом. Точность полученных прогнозов, а также применимость метода показаны в предыдущей работе авторов [1]. В рамках данной работы предлагается оценить применимость команд работы с памятью векторного сопроцессора для ускорения копирования, а также оценить применимость механизма предварительного вытеснения данных на общую производительность системы.

Применение векторных команд для ускорения работы с памятью

Векторные вычисления — это такие компьютерные вычисления, когда при выполнении одной инструкции процессора производится не одна операция, а одновременно несколько однотипных операций над несколькими порциями данных. Иначе этот принцип называется SIMD (Single Instruction, Multiple Data).

В НИИСИ РАН ранее был разработан векторный сопроцессор [2], который применяется в выбранных проектах согласно требованиям ТЗ. Вносить весь функционал векторного сопроцессора в неспециализированные проекты избыточно. Более того, поскольку векторный сопроцессор в качестве операндов использует собственный регистровый файл, то его применение сопряжено с большими трудностями по адаптации прикладного ПО (userspace), обусловленной необходимостью сохранять векторный контекст при переключении задач. В связи с этим предлжно внести в общий список команд ограниченное число команд векторного сопроцессора для работы с памятью, изменив операнды данных команд с векторных на регистры общего назначения. С помощью имитационного моделирования

были получены оценки максимального ускорения процедуры копирования при внесении этого изменения в проект.

Исследование механизма предварительного вытеснения данных

Вторая оптимизация, предложенная в работе, — это механизм anti-prefetch. Заблаговременное фоновое независимое от LRU вытеснение невостребованных данных из памяти освобождает процессору место для размещения новых данных, решая проблему загрязнения кеш-памяти. В работе представлен алгоритм поиска устаревших строк, а также исследованы различные алгоритмы вытеснения, так как избыточная очистка кеш-памяти может, наоборот, сократить производительность. Применение имитационного моделирования позволило оценить различные алгоритмы вытеснения и предсказать влияние данного механизма на производительность системы в целом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0004

Литература

1. Chibisov P., Grevtsev N., Kuleshov A. and Zubkovsky P. Using Architecture Simulation Tool for Memory Subsystem Evaluation in Multi-core Systems // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 2021. P. 1–7.
2. Аряшев С. И., Зубковский П. С., Цветков В. В. Реализация функции копирования массивов на векторном сопроцессоре // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем, 2018. — Выпуск 3. — С. 144–147.

УДК 004.318

Оптимизация контроллера оперативной памяти DDR4 процессоров серии «Эльбрус»

Петров И. А.¹, Недбайло Ю. А.²¹ АО «МЦСТ»119049, г. Москва, Ленинский просп., 51
masmas@mcst.ru² ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24
nonsens@mcst.ru

Описаны устройство контроллера памяти DDR4 процессоров серии «Эльбрус» и его оптимизация для повышения многопоточной производительности: настройки интерливинга, адаптивное отключение фильтра чтений, подмешивание разных разрядов адреса к номерам канала и банков, подбор глубины планировщика.

Ключевые слова: многоядерность; подсистема памяти; контроллер памяти; DDR4.

В многоядерных процессорах критически важна эффективная организация доступа в память. Причем с увеличением количества ядер все более сложным становится достижение оптимального баланса между временем доступа в память и ее пропускной способностью. Память DDR4 SDRAM поддерживается в процессорах «Эльбрус» с различным количеством ядер вплоть до шестнадцати, и соответствующий контроллер памяти был разработан [1] и оптимизирован для работы в составе этих процессоров.

Контроллер памяти отвечает за выдачу запросов чтения, записи, открытия/закрытия страниц SDRAM таким образом, чтобы максимизировать используемость пропускной способности канала и соблюсти ограничения по времени исполнения запросов. Важным компонентом контроллера памяти для решения этих задач является планировщик заявок, который на основе системы последовательно соединенных фильтров переопределяет порядок выдачи запросов в SDRAM, используя параллелизм работы с логическими банками и особенности протокола DDR так, чтобы минимизировать количество пустых циклов на шине памяти. В контроллере памяти DDR4 был введен ряд решений по оптимизации площади, занимаемой фильтрами, что позволило удвоить глубину планировщика заявок и увеличить рабочую частоту до 800 МГц, что соответствует пропускной способности одного канала памяти — 25,6 Гб/с. Для увеличения доступного объема памяти и параллелизма работы с логическими банками была добавлена поддержка стандарта DDR4 3D Stacked.

Одной из оптимизаций был выбор, какие разряды физического адреса использовать для вычисления номера канала памяти, физического банка, группы банков и логического банка. Мелкий интерливинг, то есть использование самых младших разрядов, хорошо подходит для однопоточного доступа в память, однако он увеличивает частоту переклочки страниц памяти, что при многопоточном доступе снижает ее пропускную способность. Эксперименты позволили выбрать такой



интерливинг, при котором достигается высокая производительность при любом количестве потоков.

Другой оптимизацией было адаптивное включение и выключение фильтра чтений. Рассматриваемый контроллер памяти имеет общий планировщик для операций чтения и записи. Для времени доступа в память важна скорость выполнения чтений, поэтому один из фильтров планировщика с рядом ограничений отдает им приоритет. При большом потоке запросов это приводит к частичной заполненности планировщика записями, которые пока не исполняются, что фактически уменьшает его эффективную глубину. Оптимизация отключает этот фильтр при высокой заполненности планировщика, за счет чего повышается эффективность его работы и пропускная способность памяти.

Еще одна оптимизация позволила улучшить равномерность использования каналов и банков памяти и тем самым еще повысить ее пропускную способность. При вычислении номеров банков и каналов памяти к их разрядам подмешиваются операцией XOR значения других разрядов адреса, выбор которых задается программируемыми масками.

Проблема пропускной способности памяти DRAM при большом количестве потоков была отдельно изучена, и в результате теоретического анализа и экспериментов была выбрана оптимальная глубина планировщика для обсуждаемых процессоров и найден подход к повышению эффективности доступа в память процессоров следующих поколений [2].

Благодаря всем оптимизациям в процессорах серии «Эльбрус» пропускная способность памяти DDR4 при многопоточном доступе достигает около 80% от номинальной.

Литература

1. Петров И.А. Разработка контроллера оперативной памяти для применения в современных микропроцессорах семейства «Эльбрус» // Радиопромышленность, 2019. — Т. 29. — № 3. — С. 41–47.
2. Nedbailo Yu. A. and Petrov I. A. Increasing DDR4 SDRAM throughput in parallel workloads // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Mar. 2020.

УДК 621.391.7

Аппаратное ускорение постквантовых криптографических алгоритмов

Турченко О. Ю.

ООО «КУАПП»

*Российский квантовый центр**121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
oturchenko@qapp.tech*

В работе рассматривается проблема использования постквантовых криптографических алгоритмов в современных системах передачи информации. В частности, обоснована необходимость аппаратного ускорения, предложен возможный способ аппаратного ускорения и проведен ряд экспериментов.

Ключевые слова: постквантовая криптография; аппаратное ускорение; криптографическое ядро.

Введение

На данный момент наблюдается активное изучение криптографических алгоритмов, стойких к атакам на квантовых компьютерах. Так, например, Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) опубликовал список отобранных алгоритмов для установления ключей и подписи [1]. Также в техническом комитете по стандартизации «Криптографическая защита информации» (ТК26) выделена группа по постквантовым криптографическим механизмам [2]. Однако при использовании алгоритмов постквантовой криптографии на практике можно столкнуться с рядом проблем, связанных с производительностью и большим размером ключей. Важно отметить, что данные проблемы в некоторых случаях могут быть решены с помощью горизонтального увеличения вычислительных мощностей (например покупки дополнительных HSM). Но в других случаях, например при использовании универсальных карт с интегральной схемой (UICC, смарт-карт), увеличение вычислительных мощностей не дает полноценного решения проблемы с производительностью. Поэтому в качестве эффективного решения подобных проблем для любых типов систем предлагается использование аппаратных ускорителей постквантовой криптографии.

Аппаратное ускорение постквантовых алгоритмов подписи

Перед разработкой специализированного криптографического ядра необходимо провести анализ узких мест алгоритмов для последующей оптимизации. В качестве алгоритмов для ускорения рассматривались алгоритмы подписи «Гиперикум» [3], SPHINCS+ [4] и Dilithium [5]. В алгоритме Dilithium была проведена профилирование алгоритма для различных наборов параметров. Согласно результатам профилирования основными узкими местами в алгоритме Dilithium являются функция хеширования SHA3 и алгоритмы для быстрого умножения NTT и INTT, занимающие 47, 12,85 и 6% времени работы алгоритма соответственно. Для алгоритмов SPHINCS+ и «Гиперикум» результат профилирования показал, что для любых параметров около 87% времени работы алгоритма подписи занимает функция хеширования. Обобщая полученные результаты профилирования для всех указанных



алгоритмов, можно сказать, что ускорение только функции хеширования может дать существенный прирост.

Таким образом, на отладочной плате ALINX AX7Z100: Zynq 7000 SoC XC7Z100 было проведено несколько экспериментов по ускорению работы алгоритма «Гиперикум». В ПЛИС на языке VHDL был разработан СФ-блок, реализующий функцию хеширования согласно ГОСТ Р 34.11-2012. Для улучшения производительности внутри функции сжатия SPL преобразование реализовано в виде двух параллельно работающих блоков. Разработанный СФ-блок позволяет хешировать пакеты малого размера с пропускной способностью 152 МБ/сек. В процессорной части реализован алгоритм подписи «Гиперикум». По результатам экспериментов использование аппаратного ускорения позволяет повысить производительность алгоритма подписи «Гиперикум» в 2,6 раз.

Заключение

В работе проведено профилирование алгоритмов подписи «Гиперикум», SPHINCS+ и Dilithium для последующей разработки криптографического ядра. Для алгоритма «Гиперикум» на отладочной плате разработана программно-аппаратная реализация и проведен ряд экспериментов. В последующей работе планируется аппаратная реализация вложенных алгоритмов «Гиперикум» (WOTS, FORS) для увеличения производительности за счет снижения числа операций ввода-вывода между процессорной частью и ПЛИС.

Литература

1. Post-Quantum Cryptography [Электронный ресурс]. — URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/selected-algorithms-2022> (дата обращения: 13.06.2023).
2. Структура ТК26 [Электронный ресурс]. — URL: <https://tc26.ru/about/structure/> (дата обращения: 13.06.2023).
3. «Гиперикум» — проект квантово-устойчивой схемы цифровой подписи для стандартизации в России [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ruscrypto.ru/resource/archive/tc2023/files/02_grebnev.pdf (дата обращения: 13.06.2023).
4. SPHINCS+ Stateless hash-based signatures [Электронный ресурс]. — URL: <https://sphincs.org/> (дата обращения: 13.06.2023).
5. CRYSTALS-Dilithium [Электронный ресурс]. — URL: <https://pq-crystals.org/dilithium/> (дата обращения: 13.06.2023).

УДК 004.051

Режимы быстрого рестарта вычислительных комплексов для обеспечения сбоеустойчивости

Ломако С. Г.*Инженер 2-й категории***Михайлова И. А.***Начальник отдела**ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»**119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24**lomako_s@ineum.ru, Irina.A.Mikhaylova@ineum.ru*

Рассмотрены новые режимы управления конфигурацией и питанием для ускорения рестарта вычислительных комплексов в составе автономных аппаратов и их сравнение с уже существующими режимами стандарта ACPI.

Ключевые слова: быстрая загрузка; загрузчик; быстрый старт; оптимизация времени загрузки; многопоточные вычисления; оптимизация.

Современные вычислительные устройства для управления конфигурацией и питанием используют открытый промышленный стандарт ACPI (англ. Advanced Configuration and Power Interface). Режимы ACPI описывают состояния, при которых система не выполняет команд и находится в режиме ожидания/сна или программного отключения. Цель режимов заключается в том, чтобы сократить энергопотребление устройства, пока система не используется. Ни один из режимов ACPI не предоставляет возможности программного перезапуска. Режимы программного перезапуска помогут быстро провести диагностику и включить/отключить устройства, не снимая питания со всей системы. Это решение позволит автономным аппаратам проводить диагностику неисправностей, не сбрасывая питание с ОЗУ.

Новые режимы — быстрый рестарт (Fast restart) и быстрый ресет (Fast reset), попадают в категорию G1 (рис. 1), но они не нуждаются во внешнем воздействии (Wake event) для возврата к рабочему состоянию. Также они не требуют от пользователя никакого воздействия на систему после инициации (power button).

Особенности новых режимов лучшим образом видны в сравнении с реализацией состояния S3. В режиме S3 код ОС сохраняется в ОЗУ вместе со всем контекстом. Часть системного контекста также может храниться на диске. При выходе из режима S3 загрузчик инициирует работу ОС из ОЗУ. Прямо перед стартом ОС программа начального старта восстанавливает значения регистров физических уровней памяти из энергонезависимой памяти. Оставшееся оборудование северного и южного моста инициализируется заново. Драйвера устройств не инициализируются. ОС возобновляет свою работу из ОЗУ с момента ее остановки.

Быстрый ресет позволяет заново инициализировать вычислительный комплекс и часть оборудования повторно без потери контекста пользователя и входа в режим сна. Драйвера устройств повторно не инициализируются. Быстрый рестарт сокращает время перезагрузки системы целиком, но с потерей контекста для пользователя. В обоих случаях время перезапуска сокращается за счет того, что ОС начинает свою работу из ОЗУ. Для ОС быстрый рестарт является режимом полной перезагрузки, что

позволяет вступить в силу обновлениям. Быстрый рестарт нужен для решения локальных проблем, когда оператор или ОС решили, что вычислительный процесс пошел не так. Причины для внедрения этих режимов — попытка обойти сбои оборудования и/или логические ошибки программ. Быстрый ресет и рестарт позволяют обеспечить сбоеустойчивость для автономных аппаратов без внешнего воздействия, введение новых режимов в дополнение к уже существующим считается обоснованным.

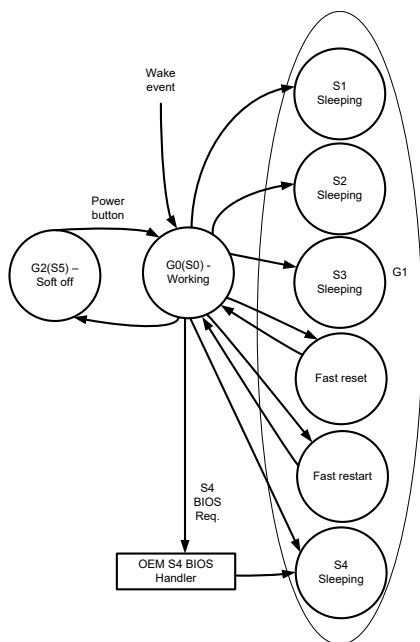


Рис. 1. Модернизированная схема перехода между состояниями

Литература

1. Advanced Configuration and Power Interface (ACPI) Specification Version 6.2, Unified EFI Forum, Inc., September 2017.
2. Vibhu Saujanya Sharma, Kishor S. Trivedi Reliability and Performance of Component Based Software Systems with Restarts, Retries, Reboots and Repairs // 17th International Symposium on Software Reliability Engineering, Raleigh, NC, USA, 2006.
3. Dae Won Kim, Sun Wook Kim, Seong-Woon Kim. Dynamic power management for Cluster system // Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, South Korea, 03 April 2012.
4. Nedbailo Y. A., Bychkov I. N., Chuchko P. A., Panchenko E. G., Slesarev M. V., Troosh A. I., Feldman V. M. Elbrus-2C3: a Dual-Core VLIW Processor with Integrated Graphics // INEUM im. I. S. Bruka, Moscow, Russia, MCST JSC Moscow, Russia, 2021.

УДК 004.415

Расширение подхода моделирования производительности Asim средствами модульного тестирования

Королев К. А.¹, Крюков П. И.^{1,2}, Ладин О. И.^{1,2}¹ ПАО «Сбербанк»

121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32 кА

PIKryukov@sberbank.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложен метод по применению модульного тестирования совместно с подходом моделирования производительности Asim. Внедрение метода в разработку программной модели целевой аппаратуры привело к созданию тестового набора с покрытием 95% кода за 30 секунд исполнения.

Ключевые слова: Asim; C++; модульное тестирование; TDD.

Оптимизация ПО требует качественного понимания устройства целевой аппаратуры. Для получения количественных оценок необходимы программные модели производительности аппаратуры — событийные либо потактовые симуляторы. Они являются сложно организованным ПО, так как их эксплуатация подразумевает постоянные модификации: уточнение, добавление новой телеметрии, поддержка новых версий аппаратуры.

Подход Asim [1] организует код симулятора разделением модели на функциональную (фидер) и временную части и декомпозицией модели на модули, объединяемые в гибкие иерархии посредством языка C++. Тем не менее верификация модели синтетическими нагрузками может быть начата только при готовности всех ключевых модулей в иерархии. Помимо этого, низкая скорость моделирования увеличивает цикл поиска и исправления ошибок [2].

Решением упомянутых проблем является внедрение модульного тестирования [3]. Нами предлагается новый метод внедрения модульного тестирования в подход Asim, состоящий из трех компонентов: генератора входных сигналов для тестируемого модуля; фидера, собирающего трассу прохождения данных через тестируемый модуль; приемника выходных сигналов, сравнивающего их и трассу с эталоном с помощью библиотек модульного тестирования. Компоненты подключаются к тестируемому модулю посредством шаблонной иерархии.

Внедрение метода позволило протестировать 95% кода модели за 30 секунд и использовать принципы разработки через тесты (TDD), благодаря чему одновременно с высоким качеством развиваются как модель, так и тестовый набор.

Литература

1. Emer J., Ahuja P., Borch E. et al. Asim: A performance model framework // IEEE Computer, 2002. Vol. 35. № 2. P. 68–76.
2. Böhm I., Franke B., Tophman N. Cycle-accurate performance modelling in an ultra-fast just-in-time dynamic binary translation instruction set simulator // 2010 International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation, 2010. P. 1–10.
3. Khorikov V. Unit Testing Principles, Practices, and Patterns. 1st ed., Manning, 2020.

УДК 621.396.621.54

Разработка мобильного радиолокатора по обнаружению беспилотных воздушных судов

Цыпленков Ю. С.¹, Анурин А. А.², Овчинников В. Г.³¹ ООО «СИНТЕЗАТОР-НН»

603057, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, 2, лит. У, оф. 315

synthesprom@yandex.ru

² АО «ФНПЦ» ННИИРТ»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, 5

anurin123@yandex.ru

³ АО «НПП» Полет»

603950, г. Нижний Новгород, ГСП-462, пл. Комсомольская, 1

ovchinnikovvg@yandex.ru

Представлены результаты технического проектирования опытного образца мобильного доплеровского радиолокатора «Антидрон-М4-01», предназначенного для раннего обнаружения, сопровождения, распознавания и идентификации беспилотных воздушных судов (БВС). Предложенное техническое решение — мобильный радиолокатор по обнаружению БВС — обладает высочайшей скоростью обновления данных (от 0,5 сек) и может применяться на наблюдательных пунктах гражданских и военных объектов. Радиолокатор может работать до 10 км и обнаруживать цели с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) 0,01 м² во всепогодных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: антенная система электронного сканирования; фазированная антенная решетка отражательного типа; диаграмма направленности; дистанционное управление антенной решеткой; радиолокатор по обнаружению дронов; беспилотное воздушное судно; адаптивная модуляция.

Цели работы — разработка мобильного доплеровского радиолокатора, обеспечивающего непрерывный мониторинг воздушной среды в радиусе 10 км, обнаружение малоразмерных малозаметных низколетящих маневрирующих объектов на сверхмалых дальностях, обнаружение и распознавание аэродинамических точечных целей, включая беспилотные воздушные суда (БВС) с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) от 0,01 м² и максимальной скоростью до 250 км/ч, мониторинг и оценка параметров движения различного класса птиц при их обнаружении, сопровождении, распознавании с заданной точностью и передача радиолокационной информации в режиме реального времени в информационную систему облачного хранилища данных.

Проблема. Появление несанкционированных БВС над территорией стратегически важных объектов несет потенциальную угрозу безопасности инфраструктуры, материальным и человеческим ресурсам.

В результате плотного взаимодействия с потенциальными заказчиками выявлена проблема повышения дальности и точности (по угловым координатам, радиальной скорости и дальности) при обнаружении малоразмерных малозаметных низколетящих низкоскоростных маневрирующих целей (дроны, беспилотники). Также было отмечено, что в условиях непогоды, тумана и плохой видимости затрудняются прием и идентификация объектов, размеры которых крайне малы — с ЭПР

от 0,01 м². Кроме того, необходимость обнаружения высокоскоростных беспилотников (от 250 км/ч) является не менее важной задачей тактического управления воздушным движением.

Решение. В настоящий момент существуют российские аналоги радиолокатора «Антидрон-М4-01», которые имеют ряд недостатков, препятствующих оперативному обнаружению и распознаванию БВС с заданной точностью в условиях плохой оптической видимости и сложной метеорологической обстановки. В частности, есть ограничения по дальности и минимальной ЭПР цели.

Предлагаемое в проекте техническое решение позволит существенно улучшить критически важные параметры радиолокатора и повысить точностные и временные характеристики системы.

За счет использования в радиолокаторе «Антидрон-М4-01» фазированной антенной решетки электронного сканирования на порядок уменьшается время обзора и сбора радиолокационных данных. Благодаря цифровому управлению диаграммой направленности достигаются сверхвысокие точности обнаружения по угловым координатам, дальности и скорости.

Описание разрабатываемой продукции

Радиолокатор по обнаружению БВС предлагаем выполнить из четырех прямоугольных фазированных антенных решеток (ФАР) секторного обзора с одним поляризационным каналом зондирования. Размер антенного полотна — ориентировочно 75×100 см, угол наклона относительно горизонтальной поверхности — порядка 60–70 градусов. Внешний вид антенной системы представляет собой усеченную пирамиду, в гранях которой располагаются антенные решетки (рис. 1). Приемно-передающая аппаратура, модуль управления и синхронизации, а также модуль цифровой обработки сигналов будут располагаться в отдельном моноблоке, размещаемом в основании пирамиды.

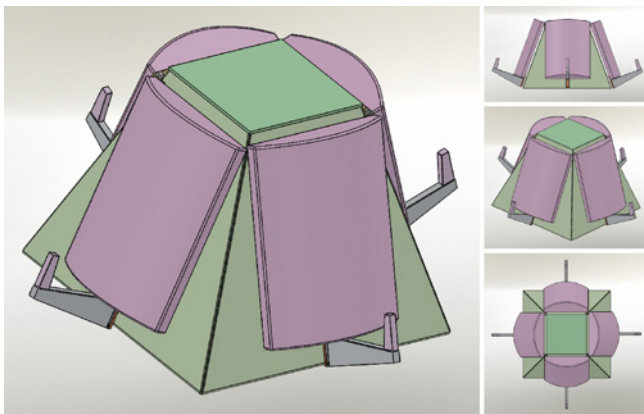


Рис. 1. Внешний вид мобильного радиолокатора «Антидрон-М4-01»

ФАР формирует по углу места луч шириной 2,1 градуса. Это позволяет при импульсной мощности передатчика 100 Вт распознавать низколетящие БПЛА с ЭПР



0,01 м² и селективировать транспорт. Азимутальное сканирование осуществляется лучом шириной 2,3 градуса. Алгоритм работы радиолокатора: 1–1,2 с поиск целей с параллельным сопровождением по целеуказанию с темпом обновления информации 0,5 с. Небольшие размеры ФАР позволяют снизить стоимость корпуса антенны и РПУ, а также обеспечить относительно низкие ветровые нагрузки.

Инновационность разработки:

- 1) интеллектуальная самотестируемая фазированная антенная решетка отражательного типа;
- 2) высокоскоростное электронное сканирование луча антенны в азимутальной и угломестной плоскостях;
- 3) возможность автоматизированного поиска фокуса и настройки антенны;
- 4) дистанционное управление диаграммой направленности по заданному алгоритму;
- 5) поиск неисправностей и контроль параметров в режиме реального времени.

Полученные результаты

Проведен расчет радиолокационной системы, получены характеристики обнаружения объектов класса «Фантом-4». Разработана эскизная конструкторская документация на отдельные модули и узлы радиолокатора, продумана концепция построения аппаратного блока и антенной решетки электронного сканирования.

Область применения

1. Корабельные радиолокационные системы — в качестве радиолокатора по обнаружению воздушных точечных целей (самолеты, вертолеты, БПЛА, крылатые ракеты).
2. Береговые радиолокационные системы — в качестве радиолокатора охраны периметров и прилегающей территории от вторжения беспилотных воздушных судов, беспилотных морских аппаратов, водолазов-нарушителей, надводных кораблей потенциального противника и иных средств нападения.
3. Наземные радиолокационные системы — в составе мобильного радиолокатора ближнего действия для спецподразделений и силовых структур.

Литература

1. Цыпленков Ю. С., Овчинников В. Г. Разработка радиолокационного приемника с большим динамическим диапазоном для обнаружения БПЛА // Материалы международной научно-технической конференции «Электронная компонентная база и модули». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 439–447.
2. Цыпленков Ю. С., Анурин А. А. Разработка малогабаритной бортовой радиолокационной станции для беспилотного воздушного судна // Материалы XIX отраслевой научно-технической конференции электронной промышленности «Электронная компонентная база и модули». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — Т. 13. — С. 197–200.
3. Цыпленков Ю. С. Бортовой радиолокатор для беспилотного воздушного судна. — М.: Воздушно-космическая сфера, 2020. — № 4. — С. 52–57.
4. Цыпленков Ю. С., Анурин А. А. Разработка малогабаритного двухполяризационного доплеровского метеорологического радиолокатора ближней зоны // Материалы научной конференции «Электронная компонентная база и модули». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — С. 137–141.

УДК 621.396

Особенности построения, разработки и использования МІМО первичных радиолокационных станций

Акула В. А., Аракелян А. А., Светлов А. Ю., Сеницын Е. А.

АО «Челябинский радиозавод «Поле»

454080, г. Челябинск, ул. Тернопольская, 6

esinit@yandex.ru

Рассматриваются особенности построения, разработки и практического применения наземных МІМО первичных радиолокационных станций, обеспечивающих при скрытной работе, малых габаритах обнаружение и измерение координат в ближней зоне действия малозаметных воздушных и наземных целей.

Ключевые слова: target; coordinate measurement; orthogonal probing signals; detection; radar; МІМО.

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития первичных радиолокационных станций (ПРЛС) является разработка ПРЛС с использованием принципов МІМО (Multiple Input Multiple Output — множественный вход — множественный выход) [1]. В антенне МІМО ПРЛС используется эффективная схема расположения антенных излучателей набора передающих и приемных каналов, позволяющая синтезировать виртуальную антенную решетку, тем самым увеличивая ее апертуру вне зависимости от физических размеров антенны. Основной отличительной особенностью МІМО ПРЛС является возможность получения высокого разрешения по дальности и угловым координатам при обнаружении воздушных и наземных малоразмерных объектов, используя малогабаритную антенну и передающие каналы с низким уровнем излучаемой мощности. Техническая реализация МІМО РЛС основана на использовании активной фазированной антенной решетки (АФАР) с особыми принципами облучения окружающего пространства, оригинальным способом формирования зондирующих сигналов (ЗС), многоканального приема и обработки радиолокационной информации. Малогабаритная АФАР МІМО РЛС формирует широкие лучи на передачу и прием. Однако путем выбранного способа формирования взаимно ортогональных ЗС и обработки ортогональных радиолокационных сигналов формируется система синтезированных узких лучей, позволяющих получить высокое разрешение по угловым координатам. Низкий уровень излучаемой мощности, использование шумоподобных, например фазоманипулированных, сигналов обеспечивает скрытность функционирования РЛС. Полностью цифровая реализация МІМО РЛС гарантирует высокую адаптивность к решаемым задачам, при этом обеспечивается возможность:

- оперативного управления формой диаграмм направленности на передачу и прием;
- текущего управления излучаемой мощностью;
- реализации различных режимов работы: одновременный обзор контролируемого пространства, равномерный и квазислучайный последовательные обзоры зоны действия, обзор пространства с пространственной селекцией (формирование максимумов и нулей диаграммы направленности



в заданных направлениях), поиск и обнаружение целей, сопровождение выбранных целей цели, пеленгование направлений внешнего излучения и т. п.).

Сравнительный анализ первичных когерентных РЛС с АФАР и ММО ПРЛС

ММО ПРЛС в режиме поиска целей может облучать весь сектор ответственности, а РЛС с ФАР необходимо время для сканирования сектора ответственности узким передающим лучом.

Отсутствие сканирования пространства в ММО ПРЛС позволяет компенсировать энергетические потери (по сравнению с ПРЛС с АФАР) путем значительного увеличения времени наблюдения целей и накопления отраженных радиолокационных сигналов [2].

Однако структура ММО ПРЛС, аппаратно-программная реализация процессов формирования, излучения когерентных ортогональных ЗС и когерентной обработки радиолокационных сигналов значительно сложнее, чем в РЛС с АФАР. Техническая реализация ММО РЛС требует внедрения следующих основных технических решений:

- современных технологий построения широкополосных излучающих элементов на базе полосковой СВЧ-техники и высокоэффективной приемопередающей аппаратуры, например, С-диапазона;
- внедрения многообразных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП);
- использования перспективных высокопроизводительных аппаратно-программных средств, например интегральных схем (ИС) программно определяемых радиосистем Software Defined Radio (SDR) типа ИС SDR AD9361, для формирования набора ортогональных ЗС и многоканальной цифровой обработки принимаемых радиолокационных сигналов, а также каналов обмена информацией с высокой пропускной способностью.

Структурная схема ММО ПРЛС

Основными функциональными частями ММО ПРЛС являются распределенный передатчик с M распределенными излучателями, распределенный приемник с N приемными антенными элементами, высокостабильный опорный генератор, синхронизатор, устройство управления и сигнальный процессор (рис. 1).

Сформированные ортогональные ЗС через парциальные независимые излучатели передаются в пространство и формируют широкие диаграммы направленности (ДН). Благодаря пространственно-временному ортогональному кодированию сигналы в пространстве не складываются и на приемной стороне могут быть различимы. Отражаясь от цели, сигналы каждого передающего канала поступают на обработку в каждый приемный канал. В результате особого расположения передающих излучателей, приемных элементов антенны и быстродействующего сигнального процессора появляется возможность синтеза виртуальной АФАР, размеры апертуры которой могут быть значительно больше по сравнению с размерами физической апертуры передающей и приемной антенн. Благодаря M передающим и N приемным каналам путем специальной математической обработки реализуется виртуальная расширенная апертура приемной антенны из $M \times N$ элементов [2],

что позволяет увеличить разрешающую способность по угловым координатам и улучшить характеристики ПРЛС без изменения физических размеров АФАР, тем самым повышая мобильность ПРЛС.

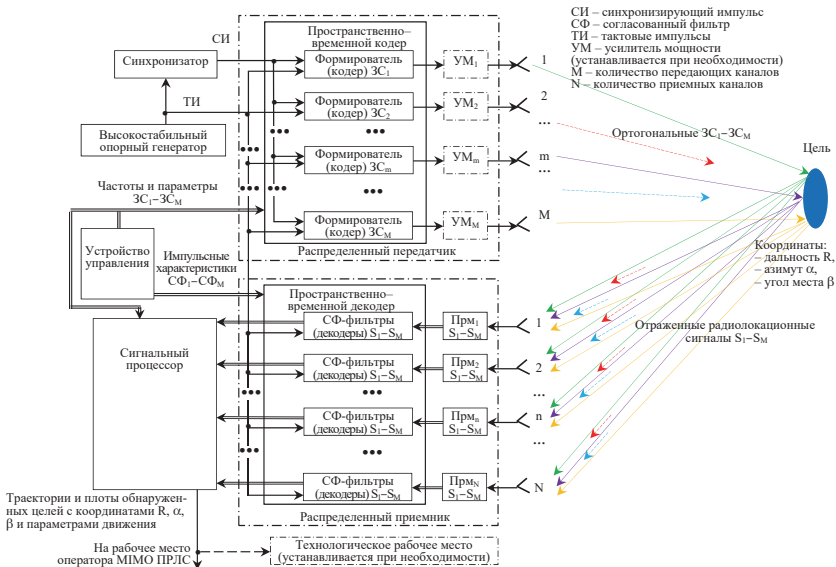


Рис. 1. Структурная схема МИМО первичной радиолокационной станции

Заключение

Представленные технические решения по созданию МИМО ПРЛС целесообразно использовать для разработки переносных малогабаритных МИМО РЛС ближней зоны действия, обеспечивающих решение следующих возможных задач: охрана объектов путем обнаружения малоразмерных нарушителей воздушного и наземного пространства, управление полетами и посадкой БПЛА, пеленгование направлений излучения внешних источников радиосигналов, обнаружение и противодействие БПЛА в ближней зоне воздушного пространства.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе МИМО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2012. — № 8. — С. 29–46.
2. Jian Li (Ph. D.). MIMO Radar Signal Processing. Wiley-IEEE Press, 2009. Радиолокационная система МИМО. — <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp25.ru.html>.

УДК 621.37.037

Алгоритмы синтеза изображений в многопозиционных МИМО-РСА

Погорельский И. В., Цветков В. К., к. т. н., Кузьмин И. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

valerbelev@gmail.com

На данный момент наблюдается развитие систем РСА космического базирования, выполненных в виде групп малых космических аппаратов по технологии МИМО. В статье рассматривается модель радара на основе пяти космических аппаратов на низкой орбите. Показаны проблемы синтеза радиолокационных изображений.

Ключевые слова: ДЗЗ; радиолокатор с синтезированной апертурой; МИМО.

Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования как активный инструмент дистанционного зондирования земной поверхности при помощи СВЧ-сигналов обладает возможностью получать разнообразную радиолокационную информацию о наземных объектах в течение дня и ночи, а также при любых погодных условиях. Таким образом, он широко используется в военной разведке, картографировании, разведке ресурсов, защите окружающей среды, чрезвычайных ситуациях и управлении ими и т. д.

Радиолокационная система с несколькими передатчиками и несколькими приемниками (МИМО) обладает огромным потенциалом для повышения производительности радиолокационной системы по сравнению с традиционными РСА космического базирования на основе АФАР. Идея разделения ресурсов одного большого спутника на группу малых спутников (например CubeSAT или MiniSAT), взаимодействующих друг с другом, обсуждалась в статье [1]. МИМО-РСА одновременно передает и принимает сигналы через несколько антенн, смещенных по азимуту и/или по дальности.

Технология МИМО позволяет рассматривать многопозиционную систему приемо-передатчиков как единую антенную решетку, где даже при использовании одного приемника имеется возможность построения синтезированной приемной апертуры и получения радиолокационного изображения, как и в одноканальном режиме. Использование данных, полученных от системы приемников, позволяет значительно увеличить объем получаемой информации об объектах на земле, ввести новые алгоритмы поиска движущихся целей, построения цифровых моделей рельефа.

В этой статье рассматривается модель системы МИМО-РСА на основе пяти космических аппаратов, расположенных вдоль одной прямой и использующих невязимокоррелирующие фазоманипулированные сигналы [2, 3]. На основе данной модели рассматриваются вопросы формирования и обработки сигналов: формирования траекторных сигналов между отдельными спутниками, восстановления единого траекторного сигнала для всей системы, а также алгоритм получения радиолокационного изображения.

Литература

1. Цветков В. К., Лялин К. С., Переверзев А. Л. и др. Построение группировки малых космических аппаратов радиолокационного зондирования Земли и синтез требований к бортовой радиолокационной аппаратуре // *Наноиндустрия*, 2022. — Т. 15. — № S8–1 (113). — С. 50–53.
2. Monti-Guarnieri A., Giudici D., Guccione P., Manzoni M., Rocca F. MIMO SAR formations: orbital diameter and synchronization tolerances // *ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020. XLIII-B1-2020. P. 631–635.
3. Kuzmin I. A., Tsvetkov V. K., Oreshkin V. I., Akashkin E. L., Dovgal T. A. Multi-position MIMO Space SAR principles and signal processing // *Proceedings of the 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2023.

УДК 621.396.677

Сравнительный анализ антенных систем для абонентских терминалов новых спутниковых группировок связи

Космынин А. Н.^{1,2}, Серегин Г. М.^{1,2}, Филонов Д. С.², Никулин А. В.²,
Худыкин А. А.³, Петров А. Н.¹, Сибирцев П.¹, Шутов А. А.¹

¹ ООО «Мэтрикс вейв»

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1
info@matrixwave.tech

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),

Научно-исследовательский центр телекоммуникаций
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ ООО «ФИЗТЕХ ТЕЛЕКОМ»

127204, г. Москва, Долгопрудненское ш., 3

В настоящий момент активно развиваются новые спутниковые системы связи. Одним из важнейших элементов таких систем являются абонентские устройства. Одним из ключевых элементов терминала является антенная система. Существует ряд подходов к построению антенных систем: зеркальные антенны, фазированные решетки, апертурные метаповерхностные антенны. В докладе приведен сравнительный анализ трех подходов построения антенной системы.

Ключевые слова: спутниковая группировка; абонентский терминал; антенна; фазированная антенная решетка; зеркальная параболическая антенна; метаповерхность.

Введение

При создании абонентских терминалов для новых спутниковых систем используются различные архитектуры антенных систем [1, 2, 3]. Классические подходы имеют ряд ограничений: так, зеркальные параболические антенны имеют большой габаритный размер, а фазированные антенные решетки — более высокую стоимость по сравнению с параболическими антеннами. Кроме того, происходит развитие новых подходов, в частности применение многоканальных кор-чипов для активных фазированных антенных решеток, а также разрабатываются принципиально новые подходы, например модулируемые метаповерхности [4,7]. Для выявления достоинств и недостатков предложенной технологии и определения оптимальных областей применения такой антенны необходимо провести сравнительный анализ.

Три метода построения антенной системы

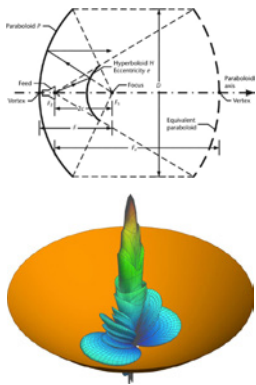
К новым антеннам предъявляются высокие требования по массогабаритным параметрам. Важное значение имеет снижение стоимости, поскольку она определяет потенциальный объем абонентской базы. Также требуются большие углы сканирования с конусом более 120 градусов для возможности работы на подвижных объектах и для работы через подвижные негеостационарные космические аппараты. Эти требования стимулируют проведение НИР и ОКР в области создания новых методов построения антенных систем. Наибольшее распространение в настоящий момент получили три метода построения антенных систем: зеркальная параболическая (ЗПА), метаповерхностная антенна (МПА), фазированная антенная решетка (ФАР).

В табл. 1 приводятся типовые требования к антенной системе.

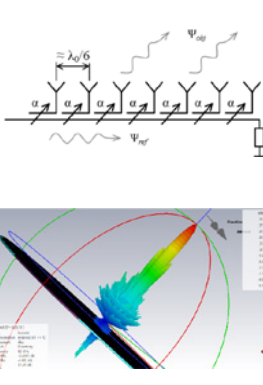
Таблица 1

Параметр	Значение	Комментарий
Коэффициент усиления, дБи	33	
Конус сканирования, град.	120	
Полоса, %	Более 20	Требуется двухдиапазонность для работы в частотном дуплексе
Габаритный размер, см	70×70×20	Требуется максимальное снижение высоты профиля

Зеркальная параболическая ЗПА



Метаповерхностная антенна МПА



Фазированная решетка ФАР

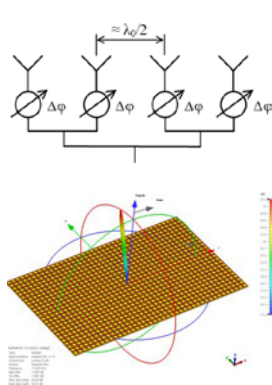


Рис. 1. Сравнительный анализ трех антенных систем

В табл. 2 приводится сравнение ключевых характеристик.

Таблица 2

Параметр	ЗПА	МПА	ФАР	Комментарий
Габарит	0,6	0,6	0,6	Определяется требуемым КУ
КИП	0,6–0,7	0,3–0,5	0,7–0,8	
КУ, дБи	>41	<35	<35	КУ ограничен величиной омических потерь
Полоса	>50%	~7%	<30%	ЗПА, как правило, ограничивается облучателем
Тип сканирования	Механическое	Ограниченное электронное	Электронное	ФАР дает наибольшие углы сканирования
Себестоимость	Р	РР	РРР	



Заключение

Сравнительный анализ показывает, что каждый способ имеет достоинства и недостатки в зависимости от конкретного способа применения. В частности, зеркальные антенны имеют наименьшую стоимость, но наибольшие габаритные размеры, что существенно ограничивает область применения. Фазированные решетки наиболее дороги в производстве, но обеспечивают наибольшую гибкость с точки зрения управления диаграммой направленности. Металповерхности обладают усредненными параметрами с точки зрения стоимости и возможности управления лучом. Выбор оптимального подхода является оптимумом между техническими требованиями решаемой задачи, техническими ограничениями выбранного подхода и экономическими параметрами.

Исследование частично поддержано Федеральной программой академического лидерства «Приоритет-2030» (численная часть) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-11-2022-011 (математическая часть)

Литература

1. Afzal Muhammad U., Esselle Karu P., Koli Mst Nishat Yasmin. A Beam-Steering Solution with Highly Transmitting Hybrid Metasurfaces and Circularly Polarized High-Gain Radial-Line Slot Array Antennas. 2022.
2. Munina Irina, Grigoriev Igor, O'Donnell Garret, Trimble Daniel. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas. 2023.
3. Aljuhani Abdurrahman H., Kanar Tumay, Zahir Samet, Rebeiz Gabriel M. A Scalable Dual-Polarized 256-Element Ku-Band SATCOM Phased-Array Transmitter with 36,5 dBW EIRP Per Polarization. 2018.
4. Burtsev V. D., Vosheva T. S., Bulatov N. O., Khudykin A. A., Ginzburg P., Filonov D. S. Compact High-Gain Volumetric Phased Array Antenna with Genetically Designed Interelement Resonances for 5G Applications. 2023.
5. Pyatibratov K. A., Seregin G. M. Research of the Characteristics of the Parabolic Reflector during Its Natural Oscillations. 2023.
6. Chesnitskiy A. V., Kosmynin A. N., Kosmynina K. N. and Lemberg K. V. Design of a multibeam metasurface antenna for LEO satellite communications payload. 2022.
7. Chesnitskiy A. V., Kosmynin A. N., Sibirtsev P. A. et al. Multibeam Antenna Implementation Using Anisotropic Metasurfaces. 2023.

УДК 004.056.53

Библиотека функций сигнальной обработки для процессора «Скиф»**Беляев А. А.^{1,2}, Иванников А. Е.¹, Колесников Д. С.¹, Кузнецов Д. А.¹, Кучинский А. С.¹, Ухова А. Р.¹, Фролов А. А.¹**¹ *АО НПЦ «ЭЛВИС»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14
secretary@elvees.com*² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Описывается библиотека функций сигнальной обработки на базе DSP-ядра Elcore50, входящего в состав процессора «Скиф» (1892BA018). Рассматриваются также возможности реализации критичных к производительности функций с помощью входящих в состав процессора специализированных аппаратных ускорителей.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов; цифровая фильтрация; быстрое преобразование Фурье; помехоустойчивое кодирование/декодирование.

Введение

Разработанный АО НПЦ «ЭЛВИС» процессор «Скиф» (1892BA018) предназначен для широкого круга мобильных применений, включая приложения искусственного интеллекта и нейронных сетей. Решение этих задач связано с выполнением разнообразных функций цифровой обработки сигналов (digital signal processing, DSP). Для этих целей в состав процессора «Скиф» включены 2-ядерный DSP-кластер на основе DSP-ядер Elcore50 [1, 2], а также набор аппаратных ускорителей: блок быстрого преобразования Фурье, турбокодер, турбодекодер, сверточный кодер, декодер Витерби.

Для ускорения создания пользовательских приложений была разработана библиотека функций сигнальной обработки для DSP-ядра Elcore50 и аппаратных ускорителей в составе процессора «Скиф».

Структура библиотеки

В качестве прототипа при создании библиотеки цифровой обработки сигналов для DSP-ядра Elcore50 была взята библиотека функций сигнальной обработки для семейства DSP-процессоров с плавающей запятой 320C66xx фирмы Texas Instruments [3]. Структура базы данных созданной библиотеки представлена на рис. 1.

Проект включает в себя:

- 1) использованные в качестве прототипов наборы референсных функций на языке C, оптимизированных функций на ассемблере и тесты для каждой из 117 функций из библиотеки Texas Instruments;
- 2) референсные функции, написанные на языке C, и оптимизированные функции, написанные на языке ассемблера, для реализации на базе DSP-ядра Elcore50;
- 3) наборы тестов для перекрестных проверок разработанных и референсных функций с генерацией случайных тестовых векторов;
- 4) программные генераторы отчетов и текстовой документации.

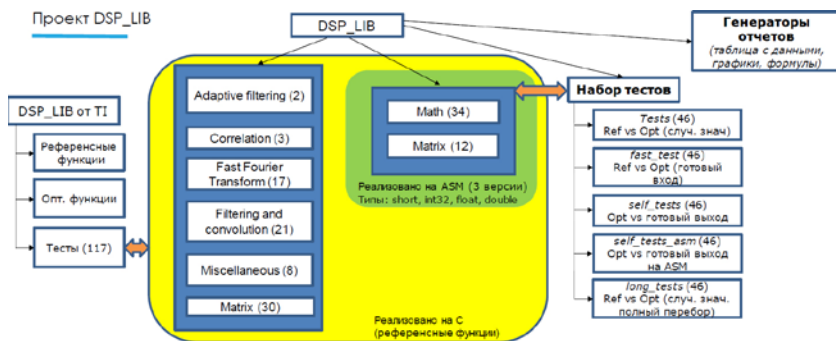


Рис. 1. Структура базы данных библиотеки функций сигнальной обработки для DSP-ядра ELcore50

Проведенные при тестировании разработанной библиотеки измерения показали увеличение производительности при реализации функций на базе DSP-ядра ELcore50 по сравнению с реализацией на базе DSP-процессоров 320C66xx в среднем в восемь раз.

Использование аппаратных ускорителей для реализации функций быстрого преобразования Фурье, турбокодера/декодера, сверточного кодера, декодера Витерби позволяет еще в несколько раз ускорить выполнение указанных функций.

Заключение

Разработанная библиотека функций сигнальной обработки на базе DSP-ядра ELcore50, входящего в состав разработанного АО НПЦ «ЭЛВИС» процессора «Скиф» (1892BA018), обеспечивает полную функциональную замену библиотеки функций сигнальной обработки для семейства DSP-процессоров 320C66xx фирмы Texas Instruments, при этом достигается существенное, в среднем в восемь раз, повышение производительности, т.е. количества вычислительных операций, выполняемых за такт.

Дальнейшее повышение производительности, в зависимости от требований приложения, может быть достигнуто за счет применения имеющихся в составе процессора «Скиф» аппаратных ускорителей.

Литература

1. Петричкович Я.Я., Солохина Т.В., Кузнецов Д.А., Меньшенин Л.В. и др. «СКИФ» — система на кристалле для мобильных и встраиваемых систем связи, навигации и мультимедиа // Электроника: Наука, Технологии, Бизнес, 2020. — № 8. — С. 120–129.
2. Петричкович Я.Я., Солохина Т.В., Кузнецов Д.А., Меньшенин Л.В., Путья Ф.М. и др. RoboDeus — 50-ядерная гетерогенная СиК для встраиваемых систем и роботехники // Электроника: Наука, Технологии, Бизнес, 2020. — № 7. — С. 52–63.
3. TI Software DSPLIB 3_4_0_0 Release Information. — [Электронный ресурс]. — URL: https://software-dl.ti.com/sdoemb/sdoemb_public_sw/dsplib/latest/index_FDS.html (дата обращения 11.08.2023).

УДК 621.371

Развитие антенно-интегрированных радиосистем нового поколения и их приложения

Ганицев А. Ю., к. т. н.

ООО «КНС ГРУПП»

123376, г. Москва, ул. Рочдельская, 15, стр. 15

В докладе рассматриваются возможные приложения новых поколений телекоммуникационных систем. Формулируются общие требования к антенно-интегрированным радиосистемам и проблемы разработки технологий массивного MIMO (Massive MIMO, M-MIMO). Обсуждаются перспективы разработки антенных систем с распределенным MIMO (Distributed MIMO, D-MIMO) для сетей 6G.

Ключевые слова: антенные системы; Massive MIMO; Distributed MIMO; 6G.

Актуальность направлений развития телекоммуникационных технологий обусловлена в первую очередь необходимостью реализации приложений в разных сферах промышленности, медицины, формирования новых услуг для конечного потребителя. Каждое новое поколение мобильной связи ориентировано на определенный вид услуг, эволюционируя от голосовой связи в первом и втором поколениях до беспроводной передачи данных в четвертом, Интернета вещей (Internet of Things) в пятом и Интернета чувств (Internet of Senses) в шестом. Активно развивающаяся концепция формирования киберфизического континуума на основе цифровых двойников, взаимодействующих с физическим миром через сенсоры и актуаторы, формирует специфические и достаточно серьезные требования к телекоммуникационным системам.

Возрастающая сложность приложений находит, в свою очередь, свое отражение в технических требованиях к антенным системам [1]. На смену пассивным антеннам базовых станций приходят антенно-интегрированные радиосистемы с многолучевыми антенными решетками, реализующими функционал массивного MIMO (Massive MIMO, M-MIMO), распределенного MIMO (Distributed MIMO, D-MIMO) и адаптации к помеховой обстановке.

В свою очередь, условия размещения оборудования на этапе эксплуатации операторами мобильной связи накладывают существенные конструктивные ограничения к габаритам систем. Как правило, оператор для обеспечения требуемой технической емкости сети использует радиопередающее оборудование, работающее одновременно в нескольких диапазонах. В частности, в России наибольшее распространение получили диапазоны частот LTE, такие как В1 (2100 МГц), В3 (1800 МГц), В7 (2600 МГц), В8 (900 МГц). В то же время развитие телекоммуникационных технологий 5G сопряжено с освоением новых диапазонов. Объединение нескольких диапазонов частот в одной радиосистеме требует применения широкополосных и совмещенных антенных решеток.

Современные многолучевые антенно-интегрированные системы должны обеспечивать возможность сканирования во всем секторе более 60° с сохранением значений коэффициента усиления и уровня боковых лепестков. Реализация совмещенных многодиапазонных антенных решеток с такими характеристиками является актуальной проблемой [2]. Решение задачи разработки таких систем требует



использования различных решений, включая разработку метаструктур, радиопрозрачных излучателей, новых подходов к системам питания пассивных антенн, позволяющих размещать приемо-передающие элементы активной антенной системы Massive MIMO.

Другим важным направлением развития антенно-интегрированных систем является разработка решений следующих поколений MIMO. Стандарт 3G Release 99 обеспечивал режимы SISO/MISO/SIMO. Пришедший ему на смену стандарт LTE Release 8 позволил обеспечить реализацию режима MIMO. Стандарт LTE Release 12 включал технологию многопользовательского MIMO (multi user MIMO, MU-MIMO). С разработкой технологией 5G связана технология Massive MIMO. Следующим шагом в направлении нового поколения является технология Distributed MIMO, позволяющая обеспечить преимущество трехмерного пространственного мультиплексирования за счет взаимодействия в одной радиосистеме нескольких антенно-интегрированных устройств, распределенных в пространстве. Задача разработки такой технологии порождает целый спектр вопросов:

- обеспечение управления системой;
- управление лучами антенн;
- многообразии вариантов излучения;
- обеспечение транспортных каналов и синхронизации между антенно-интегрированными устройствами;
- вопросы защиты информации;
- учет особенностей распространения радиоволн;
- возможности применения искусственного интеллекта и машинного обучения.

В третьем десятилетии XXI века будет развиваться Интернет чувств (Internet of Senses), мы увидим рост массовой коммуникации между интеллектуальными машинами и вступим в по-настоящему цифровой, программируемый и устойчивый мир [3]. Сетевая платформа шестого поколения призвана обеспечить это благодаря высокоскоростным соединениям, надежным системам, когнитивным сетям и сетевым вычислительным фабрикам. Антенны и антенные системы останутся ключевым элементом в 6G.

Литература

1. Пономарев Л. И., Скородумов А. И., Ганицев А. Ю. Антенные системы сотовой связи. — М.: Вузовская книга, 2015. — 160 с.: ил.
2. Пономарев Л. И., Манаенко Е. В., Терехин О. В., Васин А. А., Ганицев А. Ю., Щербачев А. Ю. Двухдиапазонные совмещенные фазированные антенные решетки // Успехи современной радиоэлектроники. Сб. статей, 2022. — Т. 76. — № 5. — С. 5–25.
3. 6G — Connecting a cyber-physical world. Ericsson White Paper GFTL-20:001402 February 2022.

УДК 621.314, 621.315, 621.396, 621.3.051.025

Система беспроводного питания датчиков, стационарно установленных в нефтегазовых скважинах**Золотарев А. В., Корешин Е. А., Цыринова А. С., Чаттерджи С., Капитанова П. В., Баранов Г. Д.***Университет ИТМО, физический факультет**197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, литер А
a.zolotarev@metalab.ifmo.ru*

Бесконтактные методы передачи энергии и информации актуальны в системах, предназначенных для работы в агрессивных условиях окружающей среды. В докладе описана система беспроводного питания телеметрического узла, расположенного на дне нефтегазовой скважины, со встроенной системой коммуникации.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; силовая электроника; телеметрия; нефтегазодобывающая отрасль.

В промышленности и машиностроении достаточно часто возникает необходимость соединения подвижных и неподвижных частей технологического оборудования в целях передачи энергии и информации. В случае вращательного движения подвижной части относительно неподвижной такая задача обычно решается при помощи контактных колец [1], выполненных из металлов с большой проводимостью, в том числе при использовании драгоценных металлов. Одним из примеров использования вращательных контактных соединений являются промышленные роботы и станки, в которых на подвижной части устройства располагается электротехническое оборудование, например электродвигатели. В случае поступательного движения, когда подвижная часть «стыкуется» с неподвижной, обычно используют контактные соединения типа «вилка — розетка». В качестве примера «стыковочных» контактных соединений можно привести современные системы заряда автономных летательных средств [2].

В условиях агрессивной окружающей среды использование контактных соединений является трудно реализуемым или невозможным. В докладе решается проблема снабжения энергией и сбора информации с телеметрического узла, расположенного на дне нефтегазовой скважины. В данном случае к агрессивным условиям относится повышенная температура (до 125 °С), а также высокая химическая активность нефтяной эмульсии. Опрос телеметрических узлов производится только во время проведения диагностики скважины, что обычно происходит с периодичностью в несколько месяцев. Для решения задачи опроса телеметрических датчиков была разработана и протестирована система беспроводной передачи энергии (БПЭ) со встроенной системой беспроводной коммуникации. Разработанное решение предназначено для интеграции в шахту нефтегазовой скважины, по которой в период диагностики опускается диагностический зонд. Схематическая реализация предлагаемой системы показана на рис. 1.

Она включает в себя модуль беспроводного питания мощностью до 10 Вт, работающий на частоте 85 кГц, и модуль беспроводной коммуникации, работающий на частоте 860 МГц. Модуль беспроводного питания выполнен на основе двух резонансных цилиндрических катушек, намотанных из литцендрата. Они помещены

в металлические трубы, которые стыкуются в процессе погружения диагностического зонда в скважину. Для минимизации потерь, связанных с проникновением магнитного потока в сталь, из которой изготовлены трубы шахты нефтегазовой скважины, в системе предусмотрено магнитное экранирование, выполненное из ферритовых стержней. Были проведены численные расчеты по оптимизации конструкции магнитного экранирования, которое позволило получить оптимальное расположение ферритовых стержней относительно передающей и приемной катушек. Для синтеза переменного тока на частоте 85 кГц были разработаны полномостовой инвертор мощностью до 15 Вт и управляемый преобразователь постоянного напряжения, предназначенный для управления всей системой БПЭ. Модуль беспроводной коммуникации реализован на основе двух кольцевых планарных антенн, обеспечивающих передачу сигнала на частоте 860 МГц. В ходе испытаний было показано, что при стыковке диагностического зонда с телеметрическим узлом катушки и антенны оказываются в одной плоскости и автоматически начинается передача энергии и обмен информации.

Эффективность передачи энергии изготовленного образца составляет до 90%, кроме того, макет прошел температурные испытания и показал свою устойчивость к повышенным температурам. Таким образом, технология беспроводной передачи энергии может найти применение в системах, предназначенных для работы в агрессивных условиях окружающей среды.

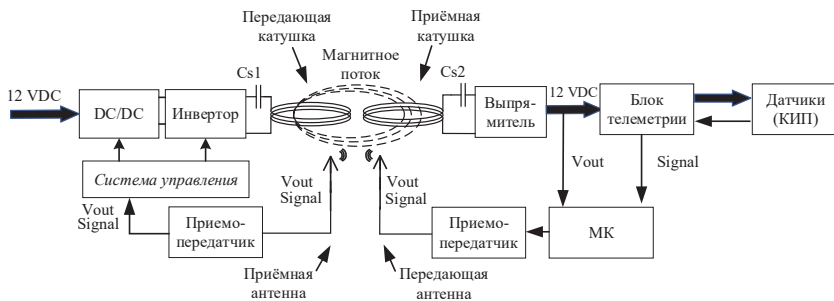


Рис. 1. Функциональная схема установки беспроводного питания с интегрированной системой коммуникации

Литература

1. Герцовский Б. М., Коблов С. С. Вращающееся контактное устройство. — 2006.
2. Lieret M. et al. An overhead docking and charging station for autonomous unmanned aircraft // 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2021. P. 1358–1363.

УДК 621.375

Проектирование устойчивых к смещениям систем индуктивного питания имплантатов**Данилов А. А.***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
arseny.danilov@gmail.com*

Рассмотрены методы проектирования устойчивых к смещениям катушек систем индуктивного питания имплантатов.

Ключевые слова: методы проектирования; беспроводная передача энергии; индуктивная связь.

Развитие методов беспроводного индуктивного питания электронных устройств является одним из наиболее важных направлений современной электроники. Особый интерес вызывает беспроводное питание активных имплантатов. Одним из ключевых требований к медицинской технике является высокая надежность. В связи с этим для систем индуктивного питания имплантатов особое значение приобретает требование высокой устойчивости к смещениям катушек относительно номинальной позиции.

Наиболее надежным способом компенсации смещений является конструирование катушек индуктивности с учетом требований по допустимому перепаду мощности. Это решение не требует усложнения конструкции устройства. Оптимизация конструкции катушек индуктивности позволяет снизить перепад мощности до 10 % от номинальной при боковых смещениях, достигающих величины радиуса приемной катушки. Для проектирования таких систем возможно использование строгих формальных алгоритмов.

Активная компенсация влияния смещений позволяет добиться постоянной мощности на нагрузке, что невозможно при пассивной компенсации через оптимизацию формы катушек. Активная компенсация может быть реализована через управление напряжением, рабочей частотой или через компенсацию изменения отраженного импеданса. Для проектирования используются нестрогие формализованные алгоритмы, требующие непосредственного участия конструктора на тех или иных этапах проектирования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания,
соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023*

УДК 616-77

Разработка алгоритмического обеспечения для проектирования систем индуктивного питания имплантатов

Аубакиров Р. Р., Данилов А. А., к. ф.-м. н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

aubakirov@bms.zone

В работе представлены алгоритмы проектирования систем индуктивного питания с последовательной и параллельной компенсацией и результаты проектирования при рабочей частоте 0,880 МГц, осевом расстоянии 15 мм, боковом смещении до 30 мм, выходной мощности 10 Вт с перепадом до 10 %.

Ключевые слова: индуктивная передача энергии; имплантируемая медицинская техника; алгоритм геометрической оптимизации.

Индуктивная передача энергии (ИПЭ) используется во многих отраслях современной электроники. Особое место системы ИПЭ занимают в имплантируемой медицинской технике (ИМТ). Дальнейшее развитие технологии ИПЭ связано с развитием автоматизированных методов проектирования и оптимизации с использованием формальных алгоритмов. Поскольку не существует единого метода проектирования таких систем, необходима разработка индивидуальных алгоритмов проектирования систем ИПЭ для каждого случая, особенно для использования в разработке ИМТ [1–3].

В данной работе представлены результаты разработки алгоритмов проектирования систем индуктивного питания ИМТ, а также результаты моделирования разработанных с помощью алгоритмов пары катушек и LC-контуров с последовательной и параллельной компенсационной схемой. Основные расчеты проводились при рабочей частоте 0,880 МГц, осевом расстоянии 15 мм, боковом смещении до 30 мм, выходной мощности 10 Вт с перепадом до 10 %.

Показано, что задача поддержания величины выходной мощности в заданном диапазоне для заданного диапазона смещения может быть решена с помощью алгоритма оптимизации конструкции LC-контуров в составе системы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ
(соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023)*

Литература

1. Triviño A., González-González J. M., Aguado J. A. Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review // *Energies*, 2021. Vol. 14. № 6. P. 1547.
2. Feng J. et al. Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. Vol. 15. № 8. P. 4656–4664.
3. Clerckx B. et al. Wireless power transfer for future networks: Signal processing, machine learning, computing, and sensing // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021. Vol. 15. № 5. P. 1060–1094.

УДК 621.3.049.7

Разработка системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому роторному насосу крови

Миндубаев Э. А., к. т. н., Морозов А. В.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**edmindubaev@gmail.com*

Разработана высокоэффективная система беспроводной передачи энергии при помощи индуктивной связи с выходной мощностью 10 Вт для питания имплантируемого насоса крови, обладающей при этом высокой эффективностью, а также устойчивостью к изменению взаимного положения передающей и принимающей катушек индуктивности.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; индуктивная связь.

Использование системы беспроводной передачи энергии для питания имплантируемого роторного насоса крови позволяет значительно уменьшить риск возникновения послеоперационных инфекций, а также повысить качество жизни пациента. Целью данной работы было проектирование высокоэффективной системы беспроводной передачи энергии при помощи индуктивной связи с выходной мощностью, достаточной для питания имплантируемого насоса крови и при этом обладающей высокой эффективностью передачи энергии, а также устойчивостью к изменению взаимного положения передающей и принимающей катушек индуктивности.

Для максимизации эффективности системы индуктивной передачи энергии необходимо максимизировать добротность передающей и принимающей частей системы. Добротность передатчика и приемника определяется в основном добротностью передающего и принимающего колебательного контура соответственно. При этом значительное влияние на добротность контуров оказывают геометрические параметры передающей и принимающей катушек индуктивности. В то же время стоит учитывать, что геометрия катушек индуктивности сложным образом влияет на устойчивость системы беспроводной передачи энергии к смещению катушек индуктивности. Таким образом, проектирование катушек с учетом компромисса между эффективностью и устойчивостью системы к смещениям катушек является сложной научно-технической задачей. В ходе разработки системы беспроводной передачи энергии к имплантируемому роторному насосу крови для этой цели был разработан алгоритм проектирования катушек, основанный на использовании эвристических методов.

Передающая часть разработанной системы беспроводной передачи энергии помимо колебательного контура включает в себя ШИМ-контроллер, на выходе которого генерируется сигнал переменного тока требуемой частоты. Рабочая частота системы составляет 880 кГц. Также в передающей части системы используется усилитель мощности класса D, который обеспечивает повышение мощности сигнала до необходимого уровня. В принимающей части системы используется полномостовой выпрямитель. Выходная мощность системы беспроводной передачи энергии составляет 10 Вт.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
(соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12.2019)*

УДК 537.852

Разработка модуля отрицательной обратной связи для стабилизации выходной мощности в системе беспроводной передачи энергии

Гуров К. О.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
constantinegurov@yandex.ru*

Разработан модуль отрицательной обратной связи для стабилизации выходной мощности в системе беспроводной передачи энергии при изменении относительного положения передающей и принимающей катушек индуктивности на основе измерения и выбора в реальном времени параметров электрических компонентов схемы.

Ключевые слова: проектирование системы беспроводной передачи энергии; стабилизация выходной мощности; обратная связь.

Целью данной работы была разработка модуля отрицательной обратной связи (МООС) для стабилизации выходной мощности в системе беспроводной передачи энергии (БПЭ), который не требует определения физического положения катушек индуктивности относительно друг друга. Это позволяет повысить безопасность и эффективность энергообеспечения прибора на нагрузке, а также увеличить срок службы прибора за счет соблюдения ограничений по току в схеме [1]. При этом МООС состоит из двух частей: измерительная, которая располагается в принимающей части системы БПЭ, а также обрабатывающая, которая располагается в передающей части системы БПЭ.

Показана экспериментальная верификация стабилизации выходной мощности в системе БПЭ с помощью разработанного прототипа МООС. Результаты подтверждают предложенную стратегию алгоритмического управления и показывают, что на нагрузке система БПЭ с МООС может стабильно отдавать 10 Вт при изменении коэффициента связи катушек индуктивности в диапазоне 0,9–0,2 и эффективности 80–20 % соответственно.

*Работа выполнена в рамках государственного задания,
соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023*

Литература

1. Zhu H., Zhang B., Wu L. Output Power Stabilization for Wireless Power Transfer System Employing Primary-Side-Only Control // IEEE Access, 2020. Vol. 8. P. 63735–63747.

УДК 621.3.051.025

Оптимизация передающих катушек систем беспроводной передачи энергии «один ко многим»**Смирнов П. А., Мирошников А. И., Зотов Н. М., Вестфаль М., Капитанова П. В.***Университет ИТМО, физический факультет**197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, литер А**pavel.smirnov@metalab.ifmo.ru*

В докладе представлен метод повышения однородности магнитного поля передающих катушек систем передачи энергии «один ко многим». Предложенный алгоритм позволяет учитывать различные формы и размеры передатчиков, что делает его универсальным средством для разработки такого рода систем.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; оптимизация; генетический алгоритм; магнитное поле; коэффициент вариации.

В настоящее время технология беспроводной передачи энергии (БПЭ) широко применяется во многих сферах, от потребительской электроники и Интернета вещей до электромобилей и медицинской техники. Наиболее распространенным классом систем БПЭ являются системы передачи энергии «один к одному», в которых передача осуществляется от одного передатчика к единственному приемнику, что накладывает значительные ограничения на удобство пользования системой и сценарии ее использования. В связи со стремительным ростом числа электронных устройств, оснащенных функцией беспроводной зарядки, а также появлением различных роботизированных систем, состоящих из роев маленьких роботов, требующих постоянного питания, концепция БПЭ «один к одному» становится все менее актуальной технологией, потому что требует использования отдельного передатчика для каждого заряжаемого устройства. С учетом этого более перспективной технологией является БПЭ «один ко многим» [1], в которой используется один большой передатчик для одновременного питания нескольких приемных устройств, расположенных на нем.

Системы «один ко многим» являются относительно новым и поэтому, актуальным направлением развития БПЭ. Главной проблемой при их реализации является обеспечение высокой эффективности, устойчивой к изменению состояния системы в процессе работы, а именно к изменению количества приемных устройств и их конкретного расположения на передатчике. Одно из главных требований для обеспечения этого — однородность распределения магнитного поля передающего резонатора, поскольку от нее зависит эффективность передачи энергии при различных положениях приемников.

Для решения данной проблемы мы разработали алгоритм оптимизации спиральных передающих катушек для систем «один ко многим». Аналитическая модель катушки основана на методе многовитковой аппроксимации [2], при этом магнитное поле рассчитывается по закону Био — Савара — Лапласа в магнитоэстатическом приближении. В ходе предварительного численного моделирования было подтверждено, что выбранное приближение оказывается справедливым в случаях, когда электрическая длина проводников, из которых изготовлена передающая катушка, сильно меньше длины волны на рабочей частоте. В качестве целевой



функции используется коэффициент вариации магнитного поля передатчика на заданной высоте. Переменными оптимизации в этом случае являются координаты проводников метаповерхности, которые являются аргументами функции для аналитического расчета магнитного поля. Поскольку количество переменных оптимизации для рассматриваемых задач велико, было принято решение использовать генетический алгоритм оптимизации, который подходит для решения оптимизационных задач с большим количеством переменных. В качестве дополнительного функционала, полезного для быстрой разработки передатчиков систем БПЭ, алгоритм включает в себя функции расчета потерь проводимости, максимальную рабочую частоту, на которой продолжает быть справедливым магнитостатическое приближение магнитного поля передатчика.

Разработанный алгоритм подходит для оптимизации круглых и прямоугольных спиральных катушек, а также катушек произвольной кусочно-линейной формы. Оптимизированные с его помощью катушки обладают в несколько раз меньшим коэффициентом вариации магнитного поля по сравнению с катушками с эквидистантным расположением витков. Например, для катушки круглой формы диаметром 40 см коэффициент вариации был уменьшен с 69 до 12%. Такие значения коэффициента вариации являются приемлемыми для реализации систем БПЭ «один ко многим», поскольку позволяют обеспечить низкую зависимость эффективности передачи энергии от конкретного положения приемника.

Литература

1. Cannon B. L., Hoburg J. F., Stancil D. D., Goldstein S. C. Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers // IEEE Transactions on Power Electronics, 2009. Vol. 24. № 7. P. 1819–1825.
2. Xu Q., Hu Q., Wang H., Mao Z. H., Sun M. Optimal Design of Planar Spiral Coil for Uniform Magnetic Field to Wirelessly Power Position-Free Targets // IEEE Transactions on Magnetics, 2021. Vol. 57. № 2. P. 4000709.

УДК 621.314, 621.315, 621.396, 621.3.051.025

Система беспроводной зарядки электротранспорта**Золотарев А. В., Баранов Г. Д., Цыринова А. С., Чаттерджи С., Терентьева П. В., Капитанова П. В.***Университет ИТМО, физический факультет**197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, литер А
a.zolotarev@metalab.ifmo.ru*

Современное состояние электротранспорта в Российской Федерации требует развития зарядной инфраструктуры, в том числе беспроводной. В докладе рассмотрен процесс разработки системы беспроводной зарядки электротранспорта мощностью 11 кВт. Представлены конструкции резонаторов, согласующих цепей и блоков силовой электроники. Особое внимание уделяется системе управления. Результаты апробированы на лабораторном образце системы. Сделаны выводы об эффективности и безопасности разработанной системы.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; электротранспорт; системы управления; алгоритмы управления; силовая электроника.

Развитие электротранспорта в Российской Федерации стимулирует создание инфраструктуры зарядных станций. Беспроводной тип зарядных установок является одним из наиболее перспективных разновидностей зарядных станций, позволяющим избавиться от недостатков традиционных систем. В основе таких устройств лежит магнитный резонансный метод беспроводной передачи энергии. Интеграция этого подхода в системы заряда электротранспорта предполагает, что передающий резонатор может быть встроен в парковочное место или в дорожное полотно, а приемный резонатор размещен под днищем электротранспортного средства.

В ходе предыдущих работ был создан лабораторный образец системы беспроводной передачи энергии (БПЭ) мощностью 11 кВт. Расстояние между передатчиком и приемником составляет 160 мм, что соответствует типовому клиренсу электротранспортного средства. Размер передатчика и приемника — $70 \times 50 \times 18 \text{ см}^3$. Было проведено экспериментальное исследование эффективности системы и показано, что в случае соосного расположения передатчика и приемника эффективность составляет до 95%. Измеренные электрические и магнитные поля, создаваемые за пределами рабочего объема БПЭ, удовлетворяют нормам СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-0.

При интеграции системы в электромобиль нагрузкой является аккумуляторная батарея (АКБ). Высоковольтные АКБ рекомендуется заряжать в режиме контроля тока ($I_{\text{бат}}$) до некоторого уровня заряда, а затем переключать в режим контроля напряжения ($V_{\text{бат}}$). В связи с этим возникает задача, связанная с построением системы управления процессом беспроводного заряда.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ методов управления системами БПЭ, дается оценка энергетических характеристик различных решений. На основе измеренных параметров существующего лабораторного образца построена модель системы БПЭ как объекта управления.

Обычно в высокомошных системах БПЭ на передающей стороне для синтеза переменного тока используется резонансный инвертор, зачастую реализованный



на основе традиционной мостовой схемы, рис. 1. На приемной части системы для выпрямления тока приемного резонатора предусмотрен выпрямитель.

Простейшим методом контроля тока нагрузки является установка дополнительного преобразователя постоянного напряжения на приемной стороне после выпрямителя [1]. В связи с небольшой эффективностью этого подхода такое решение подходит для систем с относительно небольшой номинальной мощностью до 5 кВт.

Для построение высокоэффективных систем БПЭ большой мощности необходимо построение полноценной системы управления на передающей части системы. При управлении системой с помощью резонансного инвертора управляющей переменной является угол фазового сдвига между сигналами включения ключей [2], рис. 1. В случае управления системой при помощи дополнительного преобразователя управляющей переменной является уровень постоянного напряжения на входе инвертора [3].

Результатом исследования станут оптимальная с точки зрения энергетических и экономических показателей топология полупроводниковых преобразователей и схема управления, разработанная для интеграции в существующий лабораторный образец.

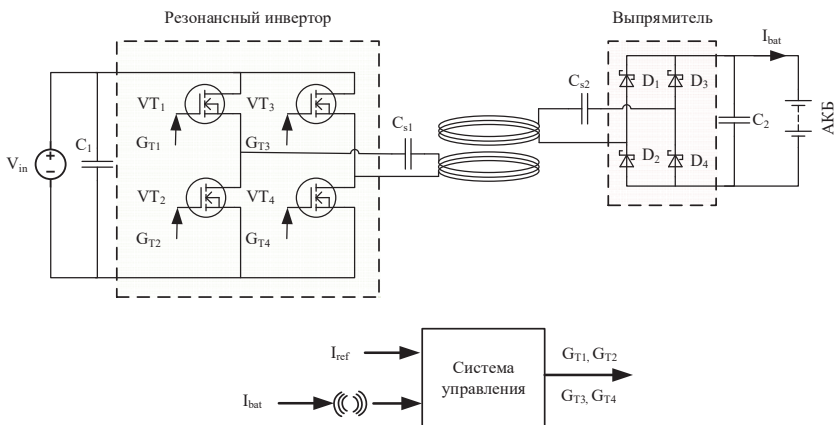


Рис. 1. Функциональная схема установки БПЭ большой мощности с контролем тока нагрузки

Литература

1. Yu G. et al. Study of back-end DC/DC converter for 3.7 kW wireless charging system according to SAE J2954 // 2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). IEEE, 2021. P. 1–8.
2. Lassioui A. et al. Adaptive Output Feedback Nonlinear Control of a Wireless Power Transfer Charger for Battery Electric Vehicle // Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021. Vol. 32. P. 492–506.
3. Miller J. M., Onar O. C., Chinthavali M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging // IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics, 2014. Vol. 3. № 1. P. 147–162.

УДК 615.473

Построение электронных систем контроля концентрации глюкозы в крови

Пожар К. В., Литинская Е. Л., Михайлов М. О.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**rozhar@bms.zone*

Предложена реализация автоматизированной системы контроля концентрации глюкозы в крови с неинвазивным оптическим датчиком обратной связи. Рассмотрены особенности управления, аспекты вычислительной сложности и необходимой компонентной базы для построения системы.

Ключевые слова: контроль концентрации глюкозы; монитор глюкозы; автоматизированное управление; замкнутая система; сахарный диабет.

Разработка современных эффективных автоматизированных систем контроля концентрации глюкозы в крови у пациентов с сахарным диабетом 1-го типа является важной задачей биомедицинской инженерии, которая позволит снизить уровень инвалидизации молодых людей, пораженных данным заболеванием. Такая система должна включать автоматический дозатор инсулина, датчик обратной связи (монитор глюкозы), автоматизированную систему управления и пользовательский интерфейс.

В предлагаемой системе датчиком обратной связи является неинвазивный оптический монитор глюкозы, основанный на спектроскопии диффузного отражения [1]. Такой датчик обратной связи дает значительное эргономическое преимущество по сравнению с подкожными микросенсорами, кроме того, все существующие подкожные микросенсоры производятся странами ЕС и США и не могут применяться в отечественных разработках. Монитор глюкозы генерирует значительный объем данных: частота измерений составляет 1 МГц объемом 16 бит каждое. Кроме того, ввиду низкой стабильности оптической системы [2] датчик оснащен дополнительными сенсорами температуры (тела, корпуса лазера и окружающей среды) и импеданса, которые с применением методов машинного обучения позволяют точнее вычислять целевую величину. На основе получаемых данных со всех датчиков система производит вычисление концентрации глюкозы раз в 5 минут. Высокие требования точности требуют использовать АЦП сигма-дельта-архитектуры, при этом необходимая полоса пропускания АЦП не менее 1 МГц значительно ограничивает выбор микросхем. Также большой объем данных требует проводить вычисления в самом устройстве. Для получения одного значения необходимо осуществить ряд оконных операций и операций усреднения с массивом данных объемом порядка 600 Мб.

Управление базальным уровнем подаваемого инсулина в системе осуществляется в автоматическом режиме [3] путем мультизонного пропорционального регулирования с гистерезисом. В случае сильных внешних возмущений ввиду медленного отклика системы на управляющее воздействие с помощью прогнозирующей модели вычисляются оптимальные параметры болюса инсулина и в интерфейс пользователя передаются рекомендуемые значения, требующие подтверждения. Нахождение наиболее эффективной комбинации шести параметров болюса



инсулина требует проведения процедуры многомерной оптимизации. В целях вычисления значения функции эффективности для каждого набора параметров необходимо решить жесткую систему из 14 нелинейных дифференциальных уравнений с одним импульсным внешним возмущением и двумя оптимизируемыми воздействиями в виде прямоугольных импульсов.

Датчик обратной связи позволяет подстраивать прогноз, снижая накопленные ошибки, а также отслеживать тренды, по анализу которых можно установить нарушения в работе системы и сигнализировать об этом пользователю. В отличие от монитора глюкозы система управления работает с небольшим объемом данных, однако требует сложных итерационных вычислений. Поскольку результатом этих вычислений являются рекомендации по терапии и управляющие команды, в соответствии с требованиями, предъявляемыми к медицинским изделиям, вычисления не могут проводиться на смартфоне или сервере и должны осуществляться на встроенных достаточно производительных интегральных схемах.

Литература

1. Pozhar K. V. et al. Noninvasive Measurement of the Glucose Level in Biological Media Based on Diffuse Reflectance Spectroscopy // *Biomedical Engineering*, 2021. Vol. 55. № 2. P. 84–89.
2. Pozhar K. V. et al. Near-Infrared Spectroscopy for Noninvasive Measurement of Blood Glucose: Problems, Progress, Tasks // *Biomedical Engineering*, 2022. P. 1–5.
3. Litinskaia E. L. et al. Problems and methods of a closed-loop blood glucose control system construction // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. Vol. 2091. № 1. P. 012020.

УДК 621.3.051.025

Реализация управления усилителем мощности для повышения устойчивости к смещениям систем индуктивного питания имплантатов**Селютина Е. В.***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
opplyana@gmail.com*

Предложен усилитель мощности (УМ) с управляемыми емкостями для поддержания постоянной мощности в системах индуктивного питания при смещениях катушек. Промоделированы системы с управляемым УМ при использовании конденсаторов с разными диэлектриками. Выявлены оптимальные параметры конденсаторов.

Ключевые слова: усилитель мощности класса E; беспроводная передача энергии; индуктивная связь; имплантируемые медицинские приборы.

Имплантируемые медицинские приборы (ИМП) поддерживают жизнь пациентов с недостаточностью органов. Одним из вариантов энергообеспечения ИМП является использование систем индуктивного питания (ИП) [1]. В этих системах отсутствуют чрескожные провода от внешнего источника питания, что обеспечивает целостность кожного покрова. Для увеличения мощности до требуемого уровня в передатчике системы ИП широко используется усилитель мощности (УМ) класса E [2].

Главным недостатком систем ИП с УМ класса E является низкая устойчивость к смещениям передающей и принимающей катушек индуктивности из-за движения пациента. Смещения приводят к уменьшению выходной мощности и общей эффективности системы. Для компенсации влияния смещений предложена схема управляемого УМ класса E. В нагрузочной цепи этого УМ проводится управление емкостью каждого из двух массивов конденсаторов для поддержания постоянной выходной мощности системы на заданном диапазоне смещений катушек.

Одним из этапов при реализации управления УМ является подбор электронных компонентов. В работе численно промоделированы системы ИП с УМ класса E при использовании массивов конденсаторов с разным типом диэлектрика. Показано, что параметры конденсаторов наиболее важны при проектировании массива конденсаторов в LC-контуре УМ. Для максимизации общей эффективности и стабилизации выходной мощности системы в этом LC-контуре следует использовать массив конденсаторов с диэлектриком NP0.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
(соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023 г.)*

Литература

1. Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y. Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review // *Sensors*, 2020. Vol. 20 (12). P. 3487-1–3487-58.
2. Liu C. Y., Wang G. B., Wu C. C., Chang E. Y., Cheng S., Chieng W. H. Derivation of the resonance mechanism for wireless power transfer using class-E amplifier // *Energies*, 2021. Vol. 14 (3). P. 632-1–632-22.

УДК 621.318.43

Оптимизация геометрии плоских катушек индуктивности с помощью эвристического алгоритма для систем индуктивного питания медицинской электроники

Морозов А. В., Данилов А. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
and.morozov.v@gmail.com

Эвристический алгоритм «поиск восхождением к вершине» и его вариации были применены к подстройке радиусов витков круглых концентрических катушек в целях максимизации коэффициента связи. Путем численного моделирования показано, что неравномерное расположение витков позволяет достичь максимального коэффициента связи.

Ключевые слова: проектирование системы беспроводной передачи энергии; питание медицинской электроники; эвристические алгоритмы.

Одним из этапов проектирования системы индуктивного питания к медицинской электронике является оптимизация геометрии катушек индуктивности по некоторой целевой функции [1]. Целевые функции для систем индуктивного питания зависят от величины взаимной индуктивности, которая рассчитывается по формуле Неймана с применением численных методов. Этот факт усложняет задачу оптимизации целевых функций, потому что нельзя построить чисто аналитическую процедуру решения. Решить задачу оптимизации неаналитических функций можно с помощью эвристических алгоритмов, которые дают не всегда точное, но близкое к точному решение.

Целью данной работы является исследование применения эвристического алгоритма «поиск восхождением к вершине» для решения задачи оптимизации геометрии катушек индуктивности в целях максимизации коэффициента связи [2].

Первоначально исследовалось применение алгоритма на трех тестовых задачах, для которых было известно решение, найденное графическим способом. Каждая из тестовых задач представляла собой поиск радиуса одного из внутренних витков в катушках индуктивности трех конфигураций в целях максимизации коэффициента связи. С помощью алгоритма были получены решения, соответствующие решениям, найденным графически.

Четыре вариации алгоритма «поиск восхождением к вершине» были применены к распределению внутренних витков в катушке индуктивности для максимизации коэффициента связи. С помощью алгоритмов были получены неравномерные распределения внутренних витков с коэффициентом связи $k = 0,503$, что превосходит коэффициент связи ($k = 0,423$) в случае равномерного распределения внутренних витков.

*Работа выполнена в рамках государственного задания,
соглашение № 075-03-2023-024 от 13.01.2023 г.*

Литература

1. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms. The MIT Press, 1998.
2. Morozov A. V., Danilov A. A. Algorithms for the Design and Optimization of Coil Pairs in Inductive Power Systems for Implants // Biomedical Engineering, 2023. Vol. 57. P. 148–152.

УДК 621.3

Перспективы развития отечественной приемо-передающей техники ДКМВ-диапазона: запрос со стороны ученых и разработчиков конечных устройств**Шиндин А. В.***Научно-исследовательский радиофизический институт**ННГУ им. Н. И. Лобачевского**603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а**shindin@rf.unn.ru*

Представлен анализ текущей ситуации на рынке микроэлектронных компонентов приемо-передающих устройств декаметрового диапазона; обозначены перспективы использования отечественной элементной базы; сформулирован запрос к отечественным поставщикам компонентов со стороны ученых и разработчиков — производителей конечных приемо-передающих средств.

Ключевые слова: радиоэлектронные устройства декаметрового диапазона; аналого-цифровые преобразователи; программируемые логические интегральные схемы; микроконтроллеры; усилители мощности; радиостанции.

Последние 18 лет научные группы, занимающиеся исследованиями ионосферы и ДКМВ- (декаметровой) радиосвязью, опираются на зарубежную элементную базу. При этом конечные приемо-передающие устройства могут быть в целом отечественными. Мировые тенденции обусловили с 2015 г. приток дешевых устройств программно-определяемого радио (SDR), которые начали широко использоваться в научных целях (особенно в ДКМВ-диапазоне). Это связано с возможностью за небольшие средства оборудовать сразу несколько приемных пунктов. В докладе представлен анализ текущей ситуации на мировом и отечественном рынках составляющих приемо-передающих устройств (АЦП/ЦАП, ПЛИС, микроконтроллеры, системы на чипе). Обозначены перспективы использования элементной базы отечественной разработки при проектировании устройств для мониторинга распространения радиоволн, зондирования ионосферы и воздействия на нее, а также создания радиостанций.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030»

УДК 621.376.9

Применение алгоритмов параллельной обработки сигналов для реализации высокоскоростного программно-конфигурируемого OFDM-модема

Цуканова Е. Е.¹, Лукьянчиков А. И.¹, Сычев А. А.¹, Клоков В. А.¹, Каргин Н. И.¹
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
cee001@mephi.ru

Рассмотрен алгоритм параллельной обработки сигналов в целях повышения производительности высокоскоростных модемов с OFDM-модуляцией за счет демultipлексирования входного потока на множество низкоскоростных и их дальнейшей независимой обработки.

Ключевые слова: OFDM; параллельная обработка сигналов; системы связи.

Введение

Для обеспечения высокоскоростного обмена данными расширяют полосу сигнала, что затрудняет его обработку из-за нехватки вычислительных ресурсов. [1] Например, с каждым новым поколением сотовой связи полоса, выделяемая под абонента, увеличивается. В условиях плотной застройки часто применяют модемы с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM). [2] Таким образом, разработка алгоритмов параллельной обработки сигналов применительно к модемам с технологией OFDM является актуальной задачей.

За счет символьной структуры демодуляция OFDM-символов хорошо поддается распараллеливанию. Это обеспечивает демодуляцию широкополосного сигнала путем его демultipлексирования на множество параллельных потоков и их последующей независимой обработки с более низкой частотой (рис. 1) [1, 2].

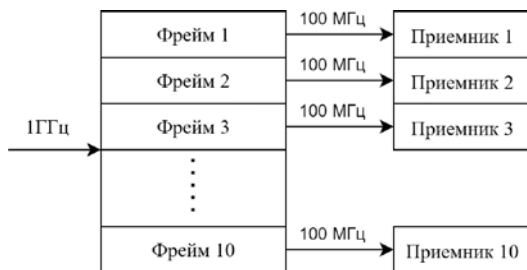


Рис. 1. Демultipлексирование широкополосного сигнала

Описание модели

Разработана параметризуемая модель OFDM-сигнала с PSK/QAM. Канал связи включает в себя белый гауссов шум, аттенюацию, сдвиг по частоте и изменяющуюся во времени дробную задержку. Приемник состоит из системы временной синхронизации, тактовой и частотной подстройки, а также демодулятора символов OFDM с подсчетом BER (англ. Bit Error Rate).

Параллельная демодуляция требует независимости OFDM-символов разных потоков. Однако она нарушается при подстройке и компенсации искажений [2]. Для устранения нежелательной межсимвольной зависимости была применена промежуточная обработка. Например, для компенсации дробной задержки используется параллельный полиномиальный интерполятор. Для грубой частотной подстройки необходим расчет начальных фаз для каждого обрабатываемого потока и задействование одного из них как «ведущего», который оценивает ошибки и определяет значения для компенсаций [2]. Для точной компенсации по частоте вместо ФАПЧ используется одноотводный корректор.

Результаты вычислительных экспериментов

Параметры полученного OFDM-сигнала:

- модуляция: 64-QAM;
- количество поднесущих: 72;
- пилотных каналов: 8;
- количество точек Фурье: 128;
- часть, выделенная под циклический префикс: 1/4 OFDM-символа;
- частота ортогональности: 20 кГц;
- полоса сигнала: 1,46 МГц;
- скорость передачи: 7,56 Мбит/с.

На рис. 2 изображены кривые помехоустойчивости в условиях гауссова шума. Представлены теоретическая кривая и полученные в результате моделирования кривые с десяти независимых приемников.

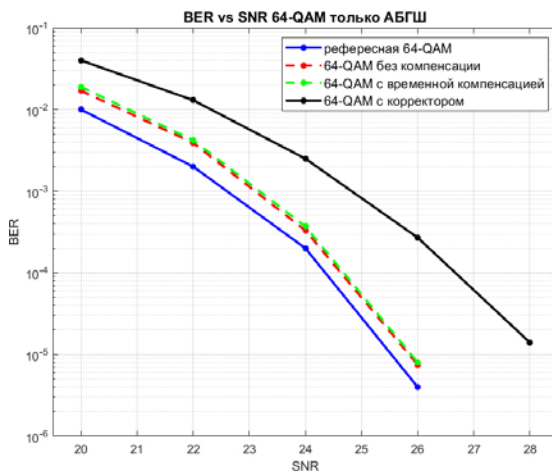


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости 64-QAM в условиях белого гауссова шума

На рис. 3 представлены кривые помехоустойчивости с использованием корректора в условиях только белого шума и в условиях шума с внесенными искажениями. Искажения состояли из сдвига по частоте на 800 Гц и плавающей дробной задержки при нестабильности кварцевого генератора в 5 ppm.

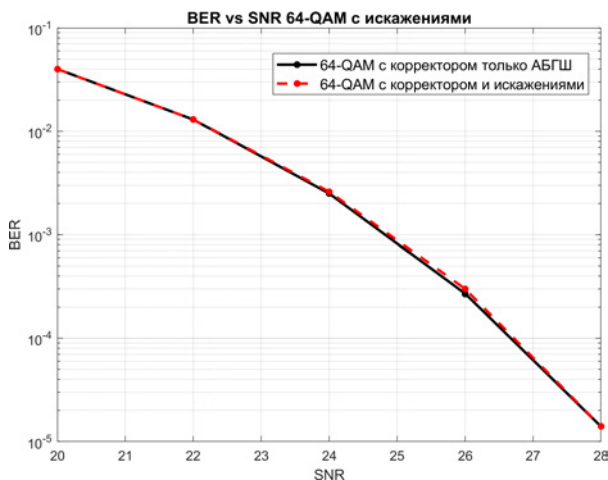


Рис. 3. Кривые помехоустойчивости 64-QAM с искажениями

Данный метод позволяет обрабатывать и распараллеливать широкополосный сигнал на ПЛИС с более низкой частотой тактирования. Используемый алгоритм применим не только в технологиях OFDM, но и в сигнально-кодowych конструкциях, имеющих кадровую структуру.

Также было выполнено сравнение модели с современными аналогами по частоте битовой ошибки при SNR = 20 дБ (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение оценки BER-модели с современными аналогами для 64-QAM при SNR = 20 дБ

Алгоритм	BER
Данная модель	$4 \cdot 10^{-2}$
[4]	$4 \cdot 10^{-2}$
[5]	$6 \cdot 10^{-3}$

Литература

1. Гаранин М. В., Журавлев В. И., Кунегин С. В. Системы и сети передачи информации. — М.: Радио и связь, 2001. — Т. 336.
2. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Шлома А. М., Шумов А. П. Технология OFDM // Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2017. — 352 с., ил.
3. Costa E., Pupolin S. M-QAM-OFDM system performance in the presence of a non-linear amplifier and phase noise // IEEE transactions on Communications, 2002. Vol. 50. № 3. P. 462–472.
4. Falconer D. et al. Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems // IEEE Communications Magazine, 2002. Vol. 40. № 4. P. 58–66.

УДК 004.056.55

Отечественная сим-карта для Интернета вещей с функцией защиты IP-трафика

Кузнецов А. С., к. ф.-м. н.
АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
akuznetsov@niime.ru

Рассматриваются пути решения проблемы защиты информации в Интернете вещей с помощью разработанной в АО «НИИМЭ» сим-карты с криптографическими приложениями для защиты IP-трафика. В продукте реализована поддержка сетевых протоколов TLS и IPsec с использованием российских криптографических алгоритмов.

Ключевые слова: Интернет вещей; протоколы защиты данных; российская криптография.

Введение

Очень быстрый рост рынка Интернета вещей (IoT) [1] приводит к тому, что вопросам безопасности и защиты информации в IoT зачастую уделяется недостаточное внимание [2]. В то же время во всем мире и в России продолжается увеличение числа устройств IoT [3], в том числе подключенных к сети Интернет с использованием мобильных сетей [4]. Для передачи данных в IoT используются как стандартные IP-протоколы, так и специализированные промышленные не-IP-протоколы передачи данных [5]. На сегодняшний день на рынке нет дешевых универсальных и компактных средств, решающих проблему защиты информации в сфере IoT. Существующие решения, как правило, представлены самостоятельными сложными устройствами. Цель работы — предложить решение в виде микросхемы, подходящей для массового внедрения.

Сим-карта с криптографическими приложениями

В рамках проекта создания отечественной сим-карты в АО «НИИМЭ» разработан новый продукт с предварительным названием «Брук» (в честь одного из основоположников советской вычислительной техники), подходящий для защиты каналов обмена информацией широкого круга устройств IoT. Элемент безопасности (ЭБ) «Брук» поддерживает три криптографических протокола, закрывающих почти все потребности по защите каналов передачи данных существующего парка устройств IoT. Протокол IPsec [6] позволяет создать туннель VPN и прозрачно защитить весь IP-трафик. Протокол TLS [7] обеспечивает защиту данных на прикладном уровне, удобен при клиент-серверной архитектуре и легко интегрируется в существующие системы. Промышленный протокол CRISP [5] эффективен для защиты не-IP-трафика низкой интенсивности.

ЭБ «Брук» имеет ограниченную производительность, но, тем не менее, позволяет обеспечивать защиту высоконагруженных IP-каналов передачи данных путем делегирования части функций более производительному внешнему устройству. В этом случае наиболее критичные с точки зрения безопасности операции по хранению ключей, аутентификации и выработке сессионных ключей выполняет ЭБ, а шифрование большого объема данных на временных сессионных ключах производится внешним устройством.



Изделие представляет собой микросхему в форм-факторах SIM, micro-SIM, nano-SIM или MFF2 (стандарт для eSIM) с низким энергопотреблением, пригодную для встраивания в широкий спектр устройств IoT. Микросхема ЭБ «Брук» содержит приложение USIM [8] для аутентификации в сетях GSM и, таким образом, может использоваться вместо штатной сим-карты в устройствах IoT, подключенных к сети мобильной связи.

ЭБ «Брук» продолжает линейку продуктов АО «НИИМЭ» для защиты каналов передачи данных в IoT и будет сертифицирован как СКЗИ класса КСЗ вслед за предыдущим изделием [9], успешно прошедшим тематические исследования. Микросхема «Брук» полностью разработана в АО «НИИМЭ» [10], производится ПАО «Микрон» в России и является российской микросхемой 1-го уровня.

Заключение

Разработанный АО «НИИМЭ» продукт представляет собой компактный и дешевый элемент безопасности для устройств Интернета вещей с поддержкой защиты трафика для наиболее распространенных протоколов обмена данными и интегрированной сим-картой. Появление его на рынке будет способствовать массовому внедрению средств защиты информации в IoT и повышению общего уровня информационной безопасности в сети.

Литература

1. Nordrum A. The internet of fewer things [News] // IEEE Spectrum, 2016. Vol. 53. № 10. P. 12–13.
2. Leloglu E. A Review of Security Concerns in Internet of Things // Journal of Computer and Communications, 2017. Vol. 5. P. 121–136.
3. Часин П. Рынок «Интернета вещей» России на современном этапе // IT News, 2022. — № 4.
4. Исследование МТС: К концу 2025 года четверть всех IoT-устройств в РФ будут подключены через eSIM. — <https://moskva.mts.ru/about/media-centr/soobshheniya-kompanii/novosti-mts-v-rossii-i-mire/2022-07-05/issledovanie-mts-k-koncu-2025-goda-chetvert-vseh-iot-ustroystv-v-rf-budut-podklyucheny-cherez-esim>. Дата доступа: 04.08.2023.
5. Р 1323565.1.029-2019. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Протокол защищенного обмена для промышленных систем. — М.: Стандартинформ, 2020.
6. Р 1323565.1.020-2020. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Использование российских криптографических алгоритмов в протоколе безопасности транспортного уровня. — М.: Стандартинформ, 2021.
7. Р 1323565.1.035-2021. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Использование российских криптографических алгоритмов в протоколе защиты информации ESP. — М.: Стандартинформ, 2022.
8. ETSI TS 102 223: Smart Cards; Card Application Toolkit (CAT) // ETSI, 2019.
9. Самойлов А.А., Срегеев В.Л. ПАК защиты информации в интернете вещей с использованием российской криптографии // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7. — С. 74–75.
10. Нуйкин А.В., Кравцов А.С. Разработка и внедрение кристаллов для смарт-карт на Российском и международном рынках на основе решений АО «НИИМЭ» // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016. — № 1 (161). — С. 4–8.

УДК 004.056

Система защищенного промышленного Интернета вещей «КАБИНЕТ»**Исаев А. В.***ООО «Цифровое кольцо»**111123, г. Москва, ш. Энтузиастов, 56, стр. 25, оф. 220**isaev@d-ring.ru*

Система защищенного промышленного Интернета вещей «КАБИНЕТ» предназначена для организации распределенного контроля и управления оборудованием с делегированием части функций принятия решений на уровень умных сенсоров.

Разработанная компанией «Цифровое кольцо» система промышленного Интернета вещей «КАБИНЕТ» реализует технологию распределенной (сетевцентрической) обработки, хранения и анализа данных мониторинга оборудования с возможностью принятия оперативных управленческих решений на основе заложенных аддитивных моделей.

Система «КАБИНЕТ» включает в себя процедуры интеграции оборудования любого производителя, протокол обмена данными прикладного уровня, средства криптографической защиты информации.

Разработана линейка встраиваемых и автономных контроллеров, которые интегрируются с датчиком, компактной группой датчиков или оборудованием. Контроллеры содержат процессор, контуры АЦП и управления, крипточип или криптопровайдер, энергонезависимую память, радиомодем узкополосной передачи данных большого радиуса действия. Линейка также включает персональный трекер, способный контролировать и передавать физиологические параметры сотрудника и оперативно информировать об аварийных ситуациях.

Ключевыми преимуществами системы «КАБИНЕТ» являются снижение аварийности за счет раннего обнаружения негативных тенденций, продление сроков эксплуатации оборудования, кратное снижение затрат на сервисное обслуживание, резкое снижение затрат на развертывание и пусконаладку систем мониторинга и управления, особенно на территориально удаленных объектах.



УДК 629.3.052.3

Аудиоприемник радиосистемы с поддержкой сетевого протокола AES67

Стальнова Л. В., Бельков П. С.

ООО «Октава ДМ»

300000, г. Тула, ул. Каминского, 24

На российском рынке отсутствуют отечественные производители цифровых радиосистем, соответственно? потребитель вынужден приобретать радиосистемы производства КНР, однако в профессиональной музыкальной индустрии, как правило, работают на зарубежных радиосистемах (Shure (США), Sennheiser (Германия) и подобных). А по программе параллельного импорта стоимость и сроки поставки зарубежных радиосистем значительно выросли.

Базовая функциональная конструкция всех радиосистем построена на взаимодействии двух основных модулей — передатчика и приемника. Передатчик по цифровому радиоканалу передает сигнал на приемник. Приемник радиосистемы предназначен для беспроводного приема звукового сигнала, его обработки, преобразования в цифровой или аналоговый вид и дальнейшей передачи его на звукоусилительное оборудование.

В комплекты радиосистем может входить несколько передатчиков (микрофонов) и один приемник (ресивер) с несколькими каналами для захвата сигналов со всех передатчиков.

Разрабатываемый продукт (устройство) представляет собой приемо-передающее устройство, состоящее из основных узлов: демодулятор, АЦП, микроконтроллер, мультиплексор и кодер для сопряжения с внешними устройствами по протоколу AES67. За основу принимается отечественная электронная компонентная база, то есть доля импортных комплектующих составит менее 40%.

За реализацию функции передачи цифрового звука и возможности удаленной настройки и мониторинга изделия отвечает внедренный протокол AES 67. Протокол AES67 — это технический стандарт взаимодействия аудиоданных по Ip и Ethernet. Лицензия на этот протокол условно открытая.

Если рассматривать конкурентное окружение продукта, то разрабатываемый приемник радиосистемы будет сопоставим по техническим характеристикам с такими моделями, как Sennheiser EW-DX-EM, Shure AD4D и AKG DMS800. Однако преимуществами отечественного продукта следующие: конкурентная цена, сервисная поддержка на территории РФ, короткие сроки поставки.

Данное решение находит применение в музыкальной, концертной, театральной и образовательной индустриях для живых выступлений, звукозаписи и конференций. Продукт относится к категории pro audio (профессиональное аудиооборудование). Объем поставок в категории pro audio увеличился по итогам 2022 года на 16,5% и составил, по оценкам экспертов, 1,47 миллиарда долларов. Однако рынок в данной категории еще не полностью восстановился после пандемии из-за сохраняющихся ограничений на публичные мероприятия. Розничная стоимость поставляемых микрофонных систем выросла на 25% по сравнению с 2022 годом в связи с СВО, а также глобальным дефицитом микросхем и ростом стоимости

на них. Траектория продаж различных товарных групп в рамках этой категории сильно варьировалась. Многие производители сообщают, что поставки были бы выше, если бы не дефицит продукции из-за проблем с цепочкой поставок и нехватки чипов. Российский рынок растет быстрее в сравнении с западным и показывает около 12% роста ежегодно (мировой рынок растет с темпом 8,9% в год). Объем российского рынка составляет около 6 млрд руб.

УДК 681.518.3

Аппаратно-программная система для проведения измерений оптически детектируемого магнитного резонанса в импульсном и непрерывном режимах

Сарайкин А. И., Клоков В. А., Саури А. Д., Жариков А. М.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**115409, г. Москва, Каширское ш., 31**aisaraikin@mephi.ru*

Представлена аппаратно-программная система для проведения ОДМР, позволяющая проводить исследования пластин алмаза, содержащих NV-дефекты, в различных режимах работы. Описаны аппаратная и программная составляющие системы, включая алгоритмы картирования кристалла и верификации одиночных NV-центров.

Ключевые слова: ОДМР; NV-центр; аппаратно-программная система.

Азотно-вакансионный (NV) центр окраски в алмазе рассматривается как предпочтительная система для генерации одиночных фотонов и индивидуальной манипуляции спином электронов при комнатной температуре [1]. В частности, его электронный спин имеет исключительно большое время когерентности, что предпочтительно по сравнению с другими системами, рассматриваемыми для квантовых вычислений, работающими при комнатной температуре, а также для измерения магнитного поля с высокой чувствительностью и разрешением на нанометровом уровне.

NV-центр в алмазе используется во многих приложениях, включая фундаментальные физические испытания, высокочувствительное измерение магнитного поля, магнитометрию, измерение электрического поля и т.д. Почти все приложения NV-центра полагаются на способность когерентно манипулировать состояниями спина NV с помощью резонансного СВЧ-возбуждения [2].

В работе представлена аппаратно-программная платформа для проведения ОДМР-исследований в полуавтоматическом режиме, содержащая следующие ключевые элементы:

1) программно-определяемый модуль, включающий:

- систему на кристалле, содержащую ПЛИС и процессорный модуль HPS, которая обеспечивает синтез сигналов произвольной формы в диапазоне 1,5–3,2 ГГц для радиомодуля, сбор данных с АЦП радиомодуля, счет фотонов с модулей фотодетекторов (APD), построение автокорреляционной функции второго порядка с двух модулей APD для поиска одиночных NV и ансамблей, управление модулем усиления СВЧ и обмен данными с ПЭВМ посредством интерфейса Ethernet 1G;
- интегральный радиомодуль, содержащий встроенные ЦАП и АЦП для формирования и оцифровки радиосигнала на промежуточной частоте, квадратурный модулятор и демодулятор для переноса сигнала с промежуточной на высокую частоту, встроенные малошумящие усилители и фильтры;
- два входа для подключения внешнего APD;

2) модуль усилителя СВЧ, содержащий:

- модуль усиления СВЧ, обеспечивающий формирование СВЧ-сигнала уровня мощности не менее 42 дБм с возможностью настройки коэффициента усиления и контроля параметров СВЧ-сигнала (контроль рабочих точек транзисторных усилителей, контроль линейности коэффициента передачи, управление аттенюацией, контроль выходного уровня мощности);
- циркулятор, предназначенный для развязки усилительного модуля от влияния антенны;

3) излучатель для эффективного подвода СВЧ-сигналов к группе NV-дефектов.

Разработанная система позволяет проводить:

- гибкие и оперативные изменения конфигурации системы с минимальными затратами времени и ресурсов без вмешательства в аппаратную часть;
- «картирование» кристалла — построение карты кристалла алмаза для локализации местоположения областей, испускающих фотоны, потенциально содержащих одиночные NV-центры алмаза;
- «верификацию» одиночных NV-центров — построение автокорреляционной функции 2-го порядка для идентификации одиночных NV-центров в алмазе.

Литература

1. Reuschel Philipp, Flatae Assegid M., Sledz Florian, Agio Mario. Optically detected magnetic resonance (ODMR). MANUAL. Master Lab Course // University of Siegen, Department of Physics, Laboratory of Nano-Optic. P. 33.
2. Wang Yuwan et al. Integrated microwave cavity and antenna to improve the sensitivity of diamond NV center spin-based sensors // Applied Physics Express 13, 112002 (2020).



УДК 621.371.32

Исследование амплитудно-фазового распределения поля с применением радиофотонных технологий

Рыжук Р. В.¹, Валуев В. В.¹, Каргин Н. И.¹, Кулагин В. В.^{1,2}, Прохоров Д. А.¹, Горелов А. А.¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
rvryzhuk@mephi.ru*

² *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
МГУ им. М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Университетский просп., 13*

Исследована методика измерения амплитудно-фазового распределения поля при перемещении приемной антенны с использованием радиофотонного тракта. Получена зависимость интенсивности сигнала от расположения антенн. Преобразование Фурье полученного массива позволяет сформировать радиоизображение объекта.

Ключевые слова: амплитудно-фазовое распределение поля; радиофотоника; радиовидение.

Введение

Построение радиоизображений является одной из актуальных задач современной техники. Использование радиофотонных систем позволяет значительно улучшить функциональные характеристики приемо-передающих устройств за счет снижения потерь при распространении оптических сигналов и уменьшения влияния электромагнитных помех. Такие приборы находят широкое применение, в том числе в бортовых автомобильных системах, а также наземных радаров для наблюдения за дорожным движением [1].

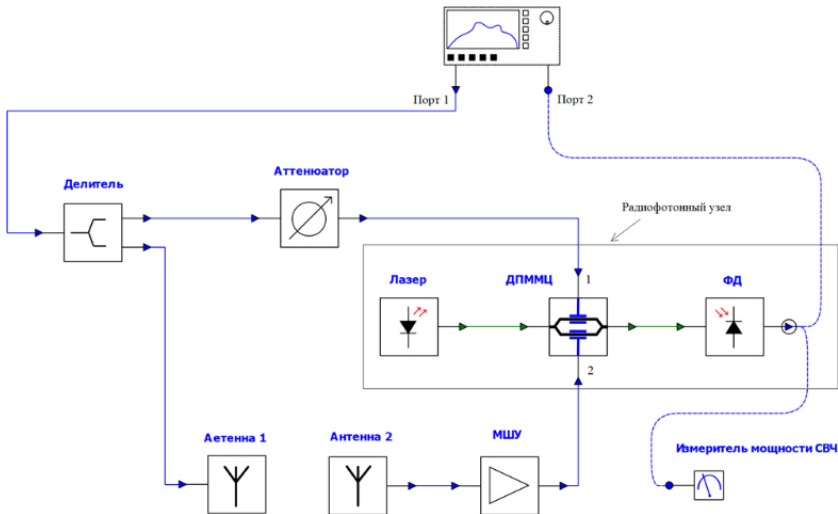
Основными принципами синтеза изображений средствами радиовидения являются метод голографии, определение амплитудно-фазового распределения в раскрыве приемной антенны, анализ отраженной от объекта волны с использованием алгоритма обратного (инверсного) синтеза апертур радаров (ISAR) и использование механизма ММО (много излучателей, много приемников) [2].

Измерение амплитудно-фазового распределения

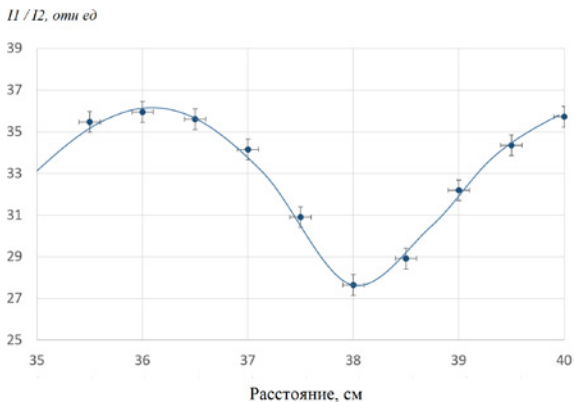
Измерение амплитудно-фазового распределения поля СВЧ-излучателя проводилось с использованием векторного анализатора цепей PNA-X (VNA), делителей СВЧ-сигналов, рупорных антенн, малошумящего усилителя с полосой 1–18 ГГц (МШУ), измерителя мощности СВЧ до 50 ГГц и радиофотонного узла, состоящего из лазера C+L-диапазона длин волн с относительным уровнем шума –145 дБ/Гц, двойного параллельного модулятора Маха—Цандера (ДПММЦ) с полосой до 20 ГГц и фотодетектора с полосой частот до 50 ГГц (ФД).

На рис. 1а представлена схема проведения измерения. Принцип ее действия состоял в следующем. На первый СВЧ-порт ДПММЦ поступал опорный сигнал от векторного анализатора цепей, ослабленный 10-дБ аттенуатором. На второй СВЧ-вход ДПММЦ поступал сигнал от приемной антенны, усиленный МШУ. На выходе модулятора эти сигналы смешивались. Если разность фаз между

сигналами составляла 2π , то их интенсивность суммировалась, а если π , то, соответственно, вычиталась. Уровень мощности сигнала на 1-м порте векторного анализатора цепей составлял 10 дБм. ДПММЦ был выставлен в квадратурный режим работы. Калибровка измерительного стенда проводилась в плоскости портов 1–2. Приемная антенна перемещалась как в продольном, так и в поперечном направлении относительно передающей антенны с шагом 4 см. В случае поперечного перемещения расстояние между антеннами на середине участка (50 см) составляло 2м.



а



б

Рис. 1. Принципиальная схема измерений (а) и АФР поля в раскрыве приемной антенны (б)

Выходной сигнал фотодетектора I_1 определялся зависимостью [2]

$$I_1 = I_2(1 + \cos \varphi),$$

где φ — разность фаз между опорным и принимаемым сигналами, I_2 — интенсивность опорного сигнала. Амплитудно-фазовое распределение (АФР) поля строилось по результатам измерения I_1 и измерителя мощности (P-Meter). На выходе фотодетектора наблюдалась периодически изменяющаяся величина мощности СВЧ-излучения. На рис. 1б представлена зависимость характеристики S_{21} от положения приемной антенны относительно уровня сигнала -90 дБ.

Заключение

При движении приемной антенны вдоль линии, соединяющей антенны, минимумы распределения интенсивности разнесены на длину волны поля излучения. При поперечном движении приемной антенны наблюдалась периодическая зависимость с максимумом, близким к положению центрального участка пути.

Проведенные исследования подтвердили работоспособность радиофотонной методики измерения АФР поля. Преобразование Фурье полученного массива позволяет сформировать радиоизображение заданного объекта.

Литература

1. Serafino G. et al. Photonic approach for on-board and ground radars in automotive applications // The Institution of Engineering and Technology, 2018. Vol. 12. Iss. 10. P. 1179–1186.
2. Valuev V. et al. Abstract Book of the 5-th Int. Conf. Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications. 2023. P. 125.

УДК 621.317.7

Характериограф нелинейных элементов и устройств, работающих в видеоимпульсном режиме

Семенов Э. В., Назаров М. А.*Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
edwardsemyonov@narod.ru*

Рассмотрены метод и система для измерения нелинейных характеристик устройств, работающих при видеоимпульсных воздействиях. Предлагаемые характеристики отражают переходные процессы в цепях первого порядка и дают хорошую оценку статической и динамической нелинейности устройств более высоких порядков.

Ключевые слова: нелинейный характериограф; видеоимпульсные сигналы; основанные на измерениях модели.

Для элементов и устройств с известной физикой работы обычно составляются эквивалентные схемы и предлагается методика экстракции параметров элементов схемы [1]. Нелинейные характеристики в таких схемах измеряются характериографами. Для измерения нелинейных характеристик устройств без конкретизации их внутренней структуры инженерам предлагается только система X-параметров и приборы для ее измерения.

Нами предложены поведенческие модели в виде многопетлевых рекурсивных фильтров с интеграторами в обратных связях. Показано, что для отражения основных особенностей переходных характеристик видеоимпульсных устройств достаточно фильтра третьего порядка [2]. Работа такого фильтра описывается пятью характеристическими функциями, которые могут претендовать на роль новой системы характеристик нелинейно-инерционных устройств и элементов, пригодной для использования в режиме видеоимпульсного воздействия.

Однако в фильтрах выше первого порядка часть характеристических функций отражает внутреннюю динамику фильтра, недоступную непосредственному наблюдению. Поэтому их отыскание выполняется с использованием рекурсивных или вариационных методов. В этом случае определение погрешности оказывается затруднительным. Для фильтра первого порядка характеристических функций оказывается всего две. Они ассоциируются с вольт-амперной (ВАХ) и кулон-вольтовой (КВХ) характеристиками элементов в эквивалентной параллельной цепи из электропроводного и емкостного элементов.

Задача измерения характеристик в фильтре первого порядка может быть решена в форме косвенных измерений с определяемой погрешностью [3]. При этом ВАХ отыскивается по плоским вершинам семейств переходных характеристик устройства при воздействии сигналами разной амплитуды. ВАХ дает знание тока электропроводного элемента, а остаточный ток относится к емкостному элементу. Интегрированием емкостного тока определяется заряд этого элемента, по плоским вершинам которого для воздействий разной амплитуды отыскивается КВХ.

Для устройств без выброса на плоской вершине такая система характеристик отражает свойства устройств с погрешностью порядка 3%. Однако осцилляции



на плоской вершине в широкополосных видеоимпульсных устройствах встречаются весьма часто. Поэтому характеристика устройств в точном смысле слова при помощи модели первого порядка имеет небольшую практическую ценность.

В докладе рассматривается вопрос о применении характеристики первого порядка для устройств, переходные характеристики которых имеют более высокий порядок. При этом ВАХ электропроводного элемента характеризует статическую нелинейность в точности. Превышение действительного порядка устройства над порядком модели приводит к значительной погрешности эквивалентной емкости объекта в целом. Однако нами показано, что нелинейность КВХ с хорошей точностью отражает относительную динамическую нелинейность устройства, даже если порядок его переходных характеристик превышает первый (есть осцилляции на плоской вершине). При нелинейности КВХ до 20 % разница нелинейности КВХ в моделях первого и второго порядка не превышает 2 %. Это дает возможность использовать рассматриваемый характеристикограф для инженерной оценки статической и динамической нелинейности видеоимпульсных устройств и элементов произвольного порядка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда,
проект № 22-29-00605*

Литература

1. Попов А., Bilevich D., Salnikov A., Dobush I., Goryainov A., Kalentyev A. Automatic large-signal GaAs HEMT modeling for power amplifier design // AEU — International Journal of Electronics and Communications, 2019. Vol. 100. P. 138–143.
2. Semyonov E. V. Synthesis of behavioral models for circuits with nonlinearity less than model error // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023. Vol. 70. № 6. P. 2216–2220.
3. Назаров М. А., Семенов Э. В. О минималистичной системе характеристик нелинейных видеоимпульсных устройств и ее измерении // Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2023. — Т. 26. — [В печати].

УДК 004.89, 621.3

Универсальная диагностическая платформа НИРФИ на базе современных микроэлектронных компонентов**Грехнева К. К., Моисеев С. П., Шиндин А. В., Павлова В. А.***Научно-исследовательский радиофизический институт**ННГУ им. Н. И. Лобачевского**603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а**kseniya81422@mail.ru*

Представлена универсальная диагностическая платформа для исследования характеристик декаметровых (ДКМВ) радиоканалов, профилей электронной концентрации в ионосфере, мониторинга режимов работы мощных ДКМВ-передатчиков.

Ключевые слова: радиоканал; система на чипе; программируемая логика; вертикальное зондирование ионосферы; наклонное зондирование ионосферы; линейно-частотно-модулированный сигнал.

Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ) в 2023 году представил универсальную диагностическую платформу для исследования характеристик декаметровых (ДКМВ) радиоканалов, профилей электронной концентрации в ионосфере, мониторинга режимов работы мощных ДКМВ-передатчиков. Разработанная платформа базируется на современных системах на чипе, объединяющих на одном кристалле вычислительные блоки общего назначения и программируемую логику, а также двухканальные АЦП и ЦАП. Характеристики платформы позволяют регистрировать сигнал в квадратурах в полосе до 2 МГц в диапазоне от 0,6 до 60 МГц. На базе платформы реализованы макеты нескольких устройств: ионозонд вертикального зондирования ионосферы, ионозонд наклонного зондирования, использующий линейно-частотно-модулированный сигнал (ЛЧМ-ионозонд), универсальный двухканальный широкополосный радиоприемник, задающий генератор для мощного передатчика. Устройства обеспечивают полный контроль характеристик сигнала, а также всего цикла цифровой обработки сигнала. Платформа допускает расширение функционала за счет реализации на программируемой логике дополнительных функций. В докладе также обсуждается вопрос о возможности перевода разработанной платформы на отечественную элементную базу. В своем текущем состоянии универсальная диагностическая платформа применялась в ходе ряда экспериментов по диагностике ионосферных возмущений и их влияния на дальнее распространение радиоволн. Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030».



УДК 550.3, 621.3

Испытания макетов приемо-передающих систем НИРФИ на экспериментальных радиофизических полигонах ННГУ

Павлова В. А., Шиндин А. В., Моисеев С. П., Грехнева К. К.

Научно-исследовательский радиофизический институт

ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а

pavlova@nirfi.unn.ru

Приведены примеры использования загородной научной инфраструктуры НИРФИ ННГУ для проведения испытаний макетов различных геофизических приборов, а также результаты этих испытаний.

Ключевые слова: диагностика ионосферы; ионозонд; радиофизические полигоны; макеты приборов; декаметровые волны; фазированные антенные решетки.

Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ) располагает широкой сетью экспериментальных радиофизических полигонов, включающей пять полигонов в Нижегородской области, полигон в Республике Крым (в районе горного массива Кара-Даг вблизи берега Черного моря), а также полигон в Республике Карелия (на берегу Ладожского озера). Полигоны различаются по степени электромагнитной зашумленности и используются для испытаний создаваемой в НИРФИ приемо-передающей радиотехники. В докладе рассматриваются описания и результаты испытаний макетов двух устройств: быстрого ионозонда вертикального зондирования IONFAST и приемника ЛЧМ-ионозонда. Оба макета собраны на базе современных систем на чипе, объединяющих на одном кристалле вычислительные модули общего назначения и программируемую логику, а также двухканальные АЦП и ЦАП. Приведены схемы тестовых экспериментов, а также результаты испытаний различных конфигураций макетов разрабатываемых приборов. В докладе затронуты также вопросы реализации ряда традиционных функций цифровой обработки сигнала на базе маломощных вычислительных средств. Результатом проделанной экспериментальной работы стало введение двух разработанных макетов приборов в опытную эксплуатацию на экспериментально-опытной базе «Васильсурск» (Нижегородская обл.) и полигоне «Карадаг». Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030».

УДК 621.3

Создание ключевых унифицированных элементов целевой аппаратуры радиолокационного мониторинга Земли на основе РСА для применения на КА малой, средней и большой размерности

Лось В. О., Костров В. В., Ракитин А. В., Шайхулин А. Р., Куликов П. В.
*АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
lvo_13@mail.ru*

В статье рассматривается возможность унификации ключевых элементов целевой аппаратуры радиолокационного мониторинга Земли на основе РСА. Антенная система, построенная на основе унифицированных секций АФАР, позволяет гибко изменять апертуру для применения на КА малой, средней и большой размерности, обеспечивая требуемые технические характеристики. Структура системы управления АФАР на основе сети GigaSpaceWire позволяет достичь высокого уровня унификации и интеграции.

Ключевые слова: РСА (радар с синтезированной апертурой); АФАР (активная фазированная антенная решетка); GigaSpaceWire.

КА радиолокационного наблюдения (РЛН), использующие радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), занимают особое место среди современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При высокой разрешающей способности, сопоставимой с системами ДЗЗ оптического диапазона, РСА обладают всепогодностью, а также уникальными видами съемки и измерительными свойствами, включая интерферометрическую съемку, дифференциальную интерферометрию и т.д. С учетом широкого круга решаемых задач становится актуальным создание ключевых унифицированных элементов для КА малой, средней и большой размерности.

Особенностью большинства существующих РСА космического применения являются достаточно крупногабаритная приемо-передающая антенная система и большая мощность излучаемого в направлении Земли радиосигнала для обеспечения основных параметров съемки, таких как радиометрическая чувствительность, радиометрическое разрешение и т.д., при возможно больших полосах захвата и обзора [1]. На фоне энергетических ограничений системы электропитания (СЭП) КА, оптимизации всех элементов приемо-передающего тракта, геометрии съемки определяются облик и требования к ключевым элементам комплекса бортовой аппаратуры в целом, появляется возможность определить направления унификации и возможного масштабирования системы для применения на КА различной размерности.

Ключевыми элементами бортовой аппаратуры (БА) РСА являются:

- антенный электронный блок (АЭБ);
- блок предварительного усиления (БПУ);
- блоки формирования и приема сигналов (БФПС);
- блок управления (БУ).



АЭБ включает в себя групповой излучатель и блок приема/передачи, совместно с БПУ позволяет обеспечивать формирование диаграммы направленности и создавать масштабируемые секции АФАР. Технические требования к унифицированным АЭБ, БПУ формируются на основе анализа возможных режимов съемки. В работе [2, 3] авторами предлагалась концепция управления АФАР на основе технологии SpaceWire / GigaSpaceWire / SpaceFibre.

В целях обеспечения максимальной гибкости при решении задач РСА, БФПС должен обеспечивать многоканальный прием, а также временную привязку протокола GigaSpaceWire к циклограмме съемки.

Блок управления обеспечивает управление БА РСА на основе технологии GigaSpaceWire и имеет в своем составе блоки накопления информации (БНИ). Масштабирование характеристик БА РСА как по скорости обмена, так и по объему накапливаемой информации обеспечивается путем изменения количества используемых БНИ.

Данный набор ключевых элементов позволяет модульно наращивать возможности БА в зависимости от задач и размерности КА.

Литература

1. Гудзов В. В., Колховский Ю. В., Криштопов А. В., Кудря А. И. Новые технологии зондирования Земли из космоса. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 482 с. ISBN 978-5-94836-2.
2. Лось В. О., Логунов А. В. Интеграция управления и информационного обмена АФАР на основе технологии SpaceWire/GigaSpaceWire/SpaceFibre // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — Москва, 2019. — С. 119–121.
3. ГОСТ Р 70020-2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов // Spacewire-RUS: Дата введения 2022-06-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Изд. официальное. — М.:, Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 621.396.96

Опыт создания и снижения стоимости и массогабаритных характеристик РСА для БПЛА

Цветков В. К., к. т. н., Лялин К. С., к. ф.-м. н., Кузьмин И. А., Мелёшин Ю. М., к. т. н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

valerbelev@gmail.com

В условиях развития средств наблюдения с БПЛА и пилотируемых летательных аппаратов вырос спрос на радиолокационные системы ДЗЗ. В статье рассмотрен ряд подходов по обеспечению технологичности, многофункциональности и снижению стоимости РСА.

Ключевые слова: РСА; радар; модульная платформа; БПЛА.

При размещении радиолокатора с синтезированной апертурой на беспилотный летательный аппарат, как правило, обращают внимание на ряд факторов, специфических или выраженных для данного типа носителя: масса, габариты, функциональность.

Серийное производство РСА для БПЛА достигает рентабельности при значительных объемах спроса, что возможно при обеспечении универсальности изготавливаемых радаров. В то же время универсальность подразумевает значительное увеличение себестоимости изделия, а также его массы и габаритов. В связи с этим предлагается подход по созданию конфигурируемой платформы, позволяющей при выборе набора комплектующих с разными характеристиками решать различные задачи. Например, для высокодетальной съемки предлагается использование X-диапазона частот зондирующих сигналов [1], для подповерхностной — Р или L [2]. При решении задач обнаружения скрытых объектов под маскирующими укрытиями, наблюдения сельскохозяйственных угодий целесообразно использовать L-диапазон [2]. В связи с этим проводится декомпозиция радиолокационной системы на узлы, оптимально заменяемые при постановке задачи съемки.

Литература

1. Guida R., Amitrano D., Iervolino P., Jenney L. and Wright L. A SAR-Based Feasibility Study on Detection of Oil Seepage from Buried Pipelines // 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020. P. 1977–1980. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323812.
2. Arii M., Yamada H., Sakamoto H. and Kojima S. Sensitivity Study of X-Band Multiparametric SAR Data From Cabbage Fields // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022. Art № 5203611. Vol. 60. P. 1–11. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3063790.

УДК 621.3

Система фазовой автоподстройки частоты тактового сигнала в сети GigaSpaceWire LVDS

Добродеев А. В., Еремеев П. М., Логунов А. В., Лось В. О.

АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

lvo_13@mail.ru

Разработана структурная схема системы фазовой автоподстройки частоты тактового сигнала в сети GigaSpaceWire LVDS. Выбрана схема фазового детектора. Рассчитан фильтр нижних частот, обеспечивающий устойчивость системы ФАПЧ. Проведен анализ устойчивости системы по разомкнутому контуру. **Ключевые слова:** ФАПЧ; фазовая автоподстройка частоты; фазовый детектор; тактовый сигнал.

Интерфейс GigaSpaceWire (GsW) предназначен для построения систем управления реального времени. Протокол этого интерфейса содержит Time-коды, распространяющиеся по всем уровням управления с детерминированной задержкой, при этом привязка по времени осуществляется с точностью до периода Time-кода (при технической скорости 100 Мбит/с — 100 нс). Однако существуют задачи, требующие более точной привязки по времени, например, в радиолокационных системах, для которых синхронизация составных частей, в частности блока формирования и приема сигналов (БФПС) и антенной системы (например, на базе АФАР), должна быть порядка 10 нс, что для технической скорости 100 Мбит/с соответствует точности временной привязки до бита.

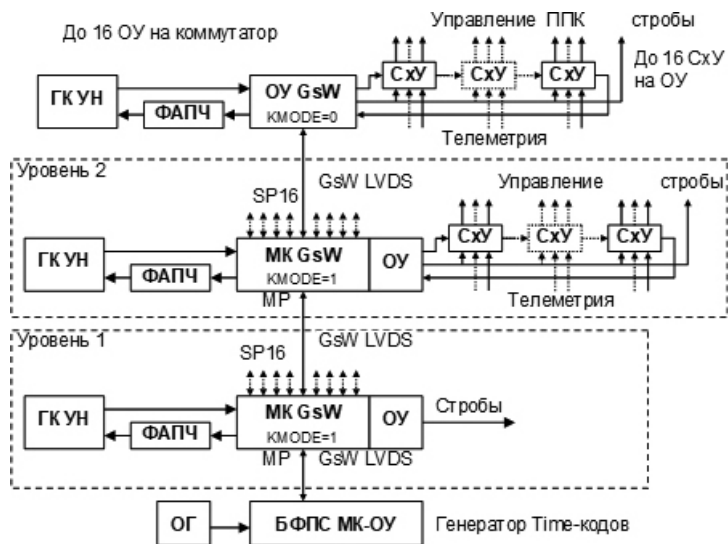


Рис. 1. Структурная схема сети GsW LVDS

На рис. 1 представлена схема системы управления АФАР. Данная система строится на основе топологии «дерево» с применением интерфейса GigaSpaceWire. В качестве генератора Time-кодов используется блок формирования и приема сигналов (БФПС). На каждом уровне системы маршрутизирующие коммутаторы (МК GsW) во временной привязке к полученному Time-коду вырабатывают набор стробов передачи и приема с запрограммированной задержкой и длительностью. Источником тактовой частоты для МК GsW является генератор кварцевый, управляемый напряжением (ГК УН). Номинальная частота генератора должна соответствовать выбранной скорости обмена в сети.

Для выполнения подстройки с точностью до бита частоты и фазы ГК УН была спроектирована система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Структурная схема системы ФАПЧ представлена на рис. 2.

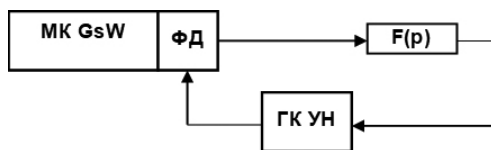


Рис. 2. Схема системы ФАПЧ

Данная система состоит из цифровой части, реализуемой на ПЛИС, и аналоговой части. Цифровая часть состоит из фазового детектора (ФД), а аналоговая — из ГК УН и RC-цепочки (F(p)), исключающей высокочастотные помехи и обеспечивающей устойчивость системы [2].

Фазовый детектор

В разработанной системе ФАПЧ используется архитектура ФД Александра [3, 4], имеющая ряд достоинств при применении в системах ФАПЧ тактового сигнала.

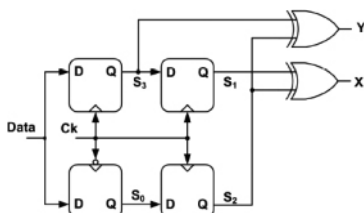


Рис. 3. Схема фазового детектора Александра

Устойчивость системы ФАПЧ

В качестве RC-цепочки, исключающей высокочастотные помехи и обеспечивающей устойчивость системы, использована базовая для систем ФАПЧ схема (рис. 4).

Анализ устойчивости системы проводится с помощью определения запаса устойчивости по фазе для разомкнутого контура $\omega_{\text{зан}}$. В теории автоматического регулирования считается достаточным запас по фазе в диапазоне от 30 до 60°.

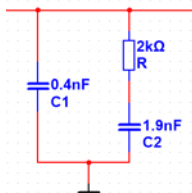


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема рассчитанного фильтра

В проектируемой системе ФАПЧ частота среза $\omega_{cp} = 100$ кГц, сопротивление резистора $R = 2$ кОм, емкости конденсаторов $C_1 = 0,4$ нФ, $C_2 = 1,9$ нФ. Запас устойчивости по фазе будет равен

$$\tau_2 = RC_2 = 2 \cdot 10^3 \cdot 1,9 \cdot 10^{-9} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ с,}$$

$$\varphi_{зап} = \text{arctg}(\omega_{cp} \tau_2) - \text{arctg}(\omega_{cp} \tau_2)^{-1} = 45^\circ.$$

На основании полученного значения запаса устойчивости по фазе можно сделать вывод, что проектируемая система ФАПЧ соответствует требованиям устойчивости.

Генератор кварцевый, управляемый напряжением

При проектировании системы ФАПЧ была использована в качестве ГК УН микросхема CFPV-45, обладающая максимальной частотой 80 МГц, диапазоном перестройки ± 100 ppm и напряжением питания 3,3 В.

Модель системы ФАПЧ

Для моделирования проектируемой системы был выбран программный комплекс Multisim [6]. Схема полученной модели проектируемой системы ФАПЧ представлена на рис. 5.

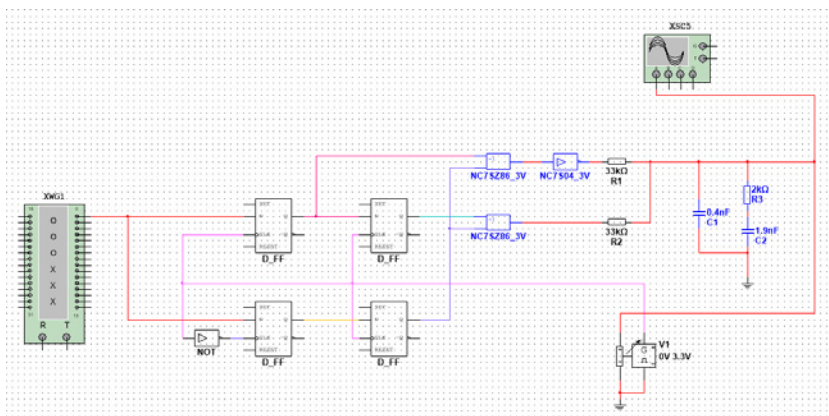


Рис. 5. Схема модели системы ФАПЧ в Multisim

Литература

1. ГОСТ Р 70020-2022.
2. Романюк В. А. Основы радиосвязи: учебник для вузов. — Москва, 2021. — 288 с.
3. M. ta Hsieh and Sobelman G. E. Architectures for multi-gigabit wirelinked clock and data recovery, 2008.
4. Lee J. Analysis and Modeling of Bang-Bang Clock and Data Recovery Circuits, 2004.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 942 с.: ил.
6. Шегал А. А. Применение программного комплекса Multisim для проектирования устройств на микроконтроллерах. — Екатеринбург, 2014. — 114 с.



УДК 629.7.05

Алгоритм спектральной обработки сигнала для доплеровского измерителя скорости и угла сноса летательного аппарата

Лавриненко А. Д., Переверзев А. Л.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**sanlav89@mail.ru, pal@olvs.miee.ru*

Рассмотрены этапы цифровой обработки сигналов в вычислительном устройстве вертолетного доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС). Отмечены факторы, влияющие на точность показаний ДИСС. Рассмотрены особенности спектра отраженного сигнала для непрерывного частотно-модулированного типа излучения. Предложен алгоритм спектральной обработки. Проведена оценка точности измерений ДИСС.

Ключевые слова: ДИСС; отношение сигнал/шум; частота Доплера; цифровая обработка сигналов; вычислительное устройство; спектральная обработка.

Введение

Предметом исследования в рамках данной работы является вычислительное устройство для вертолетного четырехлучевого ДИСС [1] с непрерывным частотно-модулированным типом излучения. На вход устройства поступает предварительно обработанный квадратурный сигнал в полосе до 1 МГц. Сигнал обрабатывается в окрестности частоты модуляции 25 КГц. В окрестности этой частоты вычисляется доплеровское смещение. Для вычисления вектора скорости ЛА в связанной с ним системе координат необходимо знать частоту Доплера по трем из четырех лучей антенны ДИСС, его геометрические характеристики.

Точность измерений вектора скорости ЛА при помощи ДИСС зависит от:

- 1) методической ошибки;
- 2) типа подстилающей поверхности;
- 3) соотношения сигнал/шум (ССШ) в спектре отраженного сигнала.

В рамках данной работы рассматриваются методы и алгоритмы, позволяющие минимизировать ошибку, связанную с ССШ.

Этапы цифровой обработки сигналов в основе вычислительного устройства ДИСС

Цифровая обработка вычислителя ДИСС состоит из двух этапов:

- 1) предварительная обработка;
- 2) спектральная обработка.

Предварительная обработка начинается с перехода в полосу окрестности частоты модуляции средством комплексного умножителя. Далее применяется фильтр низких частот (ФНЧ). Для экономии вычислительных ресурсов используется фильтр СИС [2]. Сигнал с выхода СИС переводится из временной области в частотную методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [3]. Во временной области сигнал попеременно для каждого луча антенны копится от 40 до 80 мс в зависимости от режима полета ЛА. Весь описанный тракт первичной обработки выполняется не только для окрестности частоты +25 КГц, но и для окрестности частоты –25 КГц. Это необходимо для возможности измерения фазы дальности [4],

что дает возможность оценить высоту полета ЛА. В [4] показано, что оценка высоты дает возможность увеличить точность измерений вектора скорости ЛА.

Спектральная обработка связана с данными, полученными на выходе БПФ. По этим данным строится амплитудный спектр. Частота Доплера определяется по положению максимума амплитудного спектра. В [5] предложены методы увеличения точности показаний ДИСС, разработанные на основе анализа амплитудного спектра.

Расчет фазы дальности основан на вычислении разности фаз между сигналом в окрестностях +25 и –25 КГц. Анализ экспериментальных данных летных испытаний ДИСС выявил корреляцию между фазой дальности и уровнем максимума амплитудного спектра. Применив к одной из двух составляющих сигнала механизм компенсации разности фаз, а затем просуммировав полученные амплитудные спектры (когерентное суммирование), достигают значительного прироста в уровне максимума результирующего спектра. По результатам исследования разработан алгоритм спектральной обработки.

Заключение

Проведен подробный анализ экспериментальных данных летных испытаний ДИСС. Подробно рассмотрены характеристики спектров отраженного сигнала в двух окрестностях частоты модуляции (+25 КГц, –25 КГц). Анализ показал, что когерентная сумма спектров увеличивает точность измерения скорости ДИСС на 0,6%. В результате разработан алгоритм спектральной обработки сигнала для вычислительного устройства ДИСС.

Литература

1. Колчинский В. Б. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. — М.: Советское радио, 1975. — 431 с.
2. Hogenauer E. G. An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation // IEEE Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing. Vol. ASSP-29. № 2. 1981.
3. Blackledge J. Digital Signal Processing (Second Edition). Horwood Publishing. ISBN: 1-904275-26-5, 2006. P. 404–422.
4. Лавриненко А. Д. Метод измерения высоты полета летательного аппарата в устройстве доплеровского измерителя скорости и угла сноса // 25-я Международная конференция DSPA-2023. — Москва, 2023. — С. 270–274.
5. Богданов В. А., Кузнецов М. С., Лавриненко А. Д. и др. Устройство помехоустойчивого доплеровского измерителя скорости летательного аппарата // ОКНТПР, 2022. — № 1 (153). — С. 43–51.



УДК 621.396.962.25

Аппаратный блок для формирования частотно-модулируемых сигналов с микропрограммным управлением

Силантьев А. М., Переверзев А. Л., Примаков Е. В.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

silantiev@org.miet.ru, pal@olvs.miee.ru, primakov@org.miet.ru

Представлен аппаратный блок для управления формированием частотно-модулируемых сигналов в составе систем на кристалле, реализованных в ПЛИС и ASIC. Описаны сценарии применения и способы программирования. Приведена оценка ограничений управления.

Ключевые слова: архитектура; частотно-модулируемые сигналы; система на кристалле; ПЛИС; СФ-блок.

Применение устройств с частотно-модулируемыми сигналами связано с управлением в реальном времени. Такие устройства, как радары малой дальности с использованием ЛЧМ-сигналов, могут использовать формирование сигналов с различной параметризацией, причем в некоторых задачах параметры ЛЧМ-сигналов могут меняться в реальном времени. В автомобилях датчики РЛС малой дальности используются как составная часть систем помощи водителю (ADAS — Advanced Driver-Assistance Systems) [1]. Возможно применение РЛС малой дальности действия для определения характеристик дорожного полотна [2] и работы адаптивной системы подвески.

Также, кроме задачи формирования сигналов, существует задача синхронизации излучения и приема отраженного сигнала для последующей обработки. В зависимости от характеристик радара путем подстройки выборки сигнала для обработки можно увеличить соотношение сигнал/шум. Также в ряде случаев процесс управления частотно-модулируемыми сигналами необходимо синхронизировать с другими событиями, например с включением и отключением приемо-передающих СВЧ-модулей с учетом переходных процессов.

В случае проектирования специализированной системы на кристалле для применения в ЛЧМ-радаров встает вопрос о механизмах управления формированием ЛЧМ-сигналов и обработки отраженного сигнала [3]. Данную задачу можно решить несколькими способами: аппаратное управление, программное управление с использованием процессорного ядра или аппаратный блок с микропрограммным управлением. Использование аппаратного управления позволяет эффективно в реальном времени осуществлять управление, но имеет ограничения из-за реализации алгоритма в виде конечного автомата с ограниченным немодифицируемым под конкретную задачу функционалом. В отличие от него программное управление на процессорном ядре дает большую гибкость за счет увеличения избыточных аппаратных затрат и невозможности управления в реальном времени, когда частота дискретизации сигналов сравнима с тактовой частотой процессора.

Для объединения преимуществ подходов при создании специализированной системы на кристалле для ЛЧМ-радаров был предложен аппаратный блок формирования и управления частотно-модулируемыми сигналами с микропрограммным управлением. Использование микропрограммного управления позволяет

реализовать конфигурируемое управление в реальном времени с сохранением аппаратных затрат, сравнимых с полностью аппаратной реализацией.

По результатам анализа функциональных требований была сформулирована система команд и определена структура СФ-блока с использованием памяти программ. Все инструкции разделены на типы в зависимости от применения: команды управления модуляцией, команды ожидания, команды управления прерываниями и триггерами. СФ-блок поддерживает управление передающим АЦП и принимающим ЦАП с различающимися частотами дискретизации. Представленный блок проверен в поведенческом моделировании, в прототипе на ПЛИС и в тестовой СнК, произведенной по технологическому процессу 180 нм.

Литература

1. Advanced driver-assistance systems. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_driver-assistance_systems (дата обращения: 14.08.2023).
2. Bystrov A., Hoar E., Tran T.-Y., Clarke N., Gashinova M., Cherniakov M. Sensors for Automotive Remote Road Surface Classification // Proc. 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Sept. 12–14, 2018. Madrid, Spain.
3. Brooker G. M. Understanding Millimetre Wave FMCW Radars // Proc. 1st International Conference on Sensing Technology, Nov. 21–23, 2005. Palmerston North, New Zealand. P. 152–157.



УДК 519.688

Алгоритм вычисления траекторной скорости по доплеровскому сдвигу частоты при неравномерном движении объекта

Медеев Д. А.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

medeev@olvs.miee.ru

В статье рассматривается быстродействующий алгоритм со временем наблюдения доплеровского сдвига частоты не более 2 мс и с вычислением траекторной скорости с относительной погрешностью не хуже 0,1% от измеряемой величины. Разработаны математическая модель алгоритма и архитектура вычислительного устройства для его реализации. Проведена проверка алгоритма на экспериментальных данных и дано сравнение его быстродействия с ранее разработанным алгоритмом, который используется только при детерминированном участке с неравномерным движением объекта.

Ключевые слова: траекторная скорость; алгоритм вычисления траекторной скорости; доплеровский сдвиг частоты.

Разработка эффективных и быстродействующих алгоритмов вычисления траекторной скорости при неравномерном движении объектов на сегодняшний день является актуальной научно-практической задачей. Для решения этой задачи необходимо разработать и исследовать аппаратно-программный комплекс определения параметров движения объектов с последующим вычислением их траекторной скорости.

Существует способ измерения скорости малоразмерных объектов [1], который фиксирует радиальную составляющую скорости. Отличия в измерении траекторной скорости от измерения радиальной скорости учтены в способе измерения [2]. Недостатком этого способа является снижение точности оценки скорости при неравномерном движении объекта. В [3] представлен алгоритм определения траекторной скорости, который исключает детерминированный участок с неравномерным движением, что увеличивает время наблюдения за объектом. Поэтому для повышения скорости вычисления траекторной скорости необходимо разработать математическую модель алгоритма обработки доплеровского сдвига частоты и вычислительное устройство (ВУ), которые позволят определять участок с неравномерным движением и исключать его из измерения траекторной скорости объекта.

Вычисление траекторной скорости объекта по предлагаемому алгоритму проводится следующим образом. В начале движения объекта в свободном пространстве по доплеровскому сдвигу частоты ВУ начинает формирование временных интервалов, на которых производятся измерения. Длительность временных интервалов фиксируется моментом, при котором происходит изменение радиального расстояния на некоторую известную величину. С учетом этих изменений проводится вычисление пройденных путей на каждом временном интервале, по которым вычисляются значения оценки траекторных скоростей. С увеличением радиального расстояния движение объекта становится равномерным. Соответственно, разность поступившего и предыдущего значений оценок скорости снижается. Таким образом, при снижении разности меньше заданной абсолютной погрешности

траекторную скорость объекта можно определить как среднее значение этих двух оценок траекторной скорости.

Реализация предлагаемого алгоритма выполнена на разработанном и изготовленном образце доплеровского радиолокационного устройства (РЛУ) [4]. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность измерять траекторную скорость объектов с относительной погрешностью не хуже 0,1 % при времени наблюдения не более 2 мс, что в три раза меньше, чем у алгоритма [3].

Представленный аппаратно-программный комплекс измерения траекторной скорости может быть использован в РЛУ измерения параметров движения малоразмерных объектов с последующим вычислением траекторной скорости.

Литература

1. Патент № 2250476 С2. Российская Федерация, МПК G01S 13/58. Способ измерения начальной скорости снаряда и устройство для его осуществления: № 2002126016/09: заявл. 30.09.2002; опубл. 20.04.2005 / Н. А. Зайцев, А. А. Илюха, В. В. Пыраев; заявитель ОАО «Научно-исследовательский институт «Стрела».
2. Патент № 2348946 С2. Российская Федерация, МПК G01S 13/58. способ для измерения скорости снаряда: № 2006144619/09: заявл. 15.12.2006; опубл. 10.03.2009 / А. В. Жуков, В. В. Лысак, Е. И. Макушев и др.; заявитель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный институт электронной техники (технический университет).
3. Медеев Д. А. Оценка доплеровского сдвига частоты в радиолокационных измерителях траекторной скорости // Труды 25-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения — DSPA-2023». Москва, Россия. 29 марта — 31 марта 2023 г. — С. 395—400.
4. Медеев Д. А. Определение доплеровского смещения малоразмерных высокоскоростных объектов // Тезисы докладов 28-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». г. Москва, г. Зеленоград, Россия. 29—30 апреля 2021 г. — С. 132.



УДК 004.35

Вторичный преобразователь импульсного сигнала фотоприемного устройства

Казённов К. В., Якунин А. Н.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

kirill.kazyonnov@yandex.ru

Рассмотрены способы построения вторичного преобразователя импульсного сигнала фотоприемного устройства как при помощи дискретных элементов вычислительной техники, так и путем создания специализированной заказной микросхемы.

Ключевые слова: фотоприемное устройство; оптический сигнал; обработка импульсного сигнала; заказная микросхема.

Введение

Обработка оптических управляющих сигналов включает в себя два основных этапа: трансформация сигнала из потока света в электрический импульс и последующая обработка полученного импульса. Первичные преобразователи широко изучены, и в их качестве выступают различные фотоприемные устройства. Вторичные же преобразователи постоянно совершенствуются для улучшения характеристик устройств, в которых они применяются. В связи с этим актуальна разработка схемотехнических узлов, способных обработать выходной сигнал современных фотоприемных устройств.

Способы организации вторичных преобразователей импульсного сигнала фотоприемных устройств

В ходе работы рассмотрен способ построения вторичного преобразователя импульсного сигнала фотоприемного устройства с помощью дискретных элементов. Путем анализа характеристик импульсного сигнала предложена схема его обработки и хранения информационного значения. Расчетным путем выявлены требования к используемым элементам. Предложенное решение промоделировано в программной среде NI Multisim, собран макет разработанного узла обработки сигнала. Результаты макетирования подтвердили предельные характеристики сигнала, которые способна обработать схема, полученные как расчетным путем, так и путем моделирования. Предложен способ по улучшению полученных характеристик. Выявлены основные недостатки предложенного решения: габаритные размеры и иностранное происхождение используемых микросхем.

В работе предложено переместить функции вторичного преобразователя сигнала в корпус специализированной заказной микросхемы, произвести которую способны предприятия нашей страны. Изготовлена макетная плата и продемонстрирована работа первой ревизии изготовленных микросхем, выделены особенности ее использования, предельные характеристики сигнала, поддающегося обработке, определена возможность ее применения в устройствах современной электронной техники, а также предложены варианты по ее дальнейшему усовершенствованию.

Заключение

Представлены достоинства и недостатки каждого из разработанных вариантов реализации вторичных преобразователей импульсных сигналов фотоприемных устройств, произведено их сравнение, а также дана оценка возможности применения схемотехнических узлов и пути их дальнейшего совершенствования.

УДК 004.78

Актуальные проблемы при проектировании устройств сопряжения для информационно-управляющих систем

Косенко В. А., Савченко Ю. В.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kosenko@olvs.miee.ru

Рассмотрены актуальные проблемы проектирования устройств сопряжения для информационно-управляющих систем на примере проверяющих (диагностических) информационно-управляющих систем. Рассмотрены аппаратно-программные средства организации такого сопряжения, проблемы, возникающие при их проектировании, внедрении и масштабировании [1].

Ключевые слова: информационные системы; управление; достоверность; проблемы; проектирование; внедрение; эксплуатация; абстракция; ресурсы; стандартизация.

Введение

В сравнении с информационными системами, в которых функции получения первичной информации и выдачи управляющих воздействий перекладываются на человека, системы, построенные на основе реальной связи с объектом управления, обладают высокой оперативностью и достоверностью. В то же время качество организации такой связи является одним из главных показателей качества всего управления.

Актуальные проблемы при проектировании устройств сопряжения

Рассматриваемый круг проблем, возникающих при проектировании, внедрении и эксплуатации устройств сопряжения, возникает по причине различия течения времени между виртуальным дискретным миром информационно-управляющих систем и реальным непрерывным (физическим, природным).

Устройства сопряжения информационно-управляющих систем можно разделить на устройства ввода и вывода, эти классы устройств в большинстве случаев реализуются с использованием аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей соответственно.

Внутри информационно-управляющей системы посредством устройств сопряжения ввода отображается копия (модель, цифровой двойник) окружающего ее мира (объекта управления). Качество и достоверность таких цифровых двойников напрямую влияют на итоговое качество управления.

Устройство сопряжения можно рассматривать на различном уровне абстракции. Устройство сопряжения можно рассматривать как связку нескольких дискретных элементов, или, напротив, устройство сопряжения включает в себя один или несколько вычислителей, а может являться и целым сложным комплексом вычислителей.

При разработке информационно-управляющих систем можно выделить следующие проблемы их проектирования.

Проблемы аппаратно-программных средств организации сопряжения опираются в совместное использование ресурсов вычислительной системы.

В многопроцессорных системах проблемы разделения ресурсов также являются актуальными, поскольку несколько процессов вынуждены разделять между собой одну общую шину. При построении ИУС, нуждающейся в одновременном решении нескольких достаточно сложных задач, применяют группы вычислительных комплексов, объединенных общим управлением.

Проблемы метрологической достоверности заключаются в достижении соответствия используемых в системе средств и методик измерения требованиям государственных стандартов.

Конструктивные проблемы связаны с внедрением в систему современных программно-аппаратных решений, а также методов и средств контроля, обладающих технически обоснованной точностью.

Проблемы информационной и эксплуатационной совместимости, внедрения и масштабирования — снижение ресурсоемкости контрольных операций.

Заключение

В работе проведен анализ актуальных проблем, возникающих при проектировании устройств сопряжения для информационно-управляющих систем. На примере нескольких таких систем продемонстрированы различные уровни абстракции их устройств сопряжения и рассмотрены аппаратно-программные средства организации такого сопряжения; проблемы, возникшие при их проектировании, внедрении и масштабировании: унификация и стандартизация, метрологическая, конструктивная, информационная и эксплуатационная совместимость, проблемы модульного построения (масштабирования).

Литература

1. Зайцев А. П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. — Томск: изд. ТПУ, 2000. — С. 74–89.



УДК 621.396

Образовательная платформа для изучения приемной части программно-конфигурируемых радиосистем на ЭКБ отечественного производства

Томсов В. В.^{1,2}, Будяков А. С.¹, Савченко Е. М.¹

¹ ООО «ИнноЦентр ВАО»

107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 2, стр. 2, офис 40

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В данной работе рассматриваются варианты реализации приемной части программно-конфигурируемых радиосистем (ПКР) на основе электронной компонентной базы отечественного производства. В статье приведены оценки технических характеристик и схемы ПКР с применением таких микросхем, как K1879ВЯ1Я, K1986ВЕ92Q1, и системы на кристалле «Скиф».

Ключевые слова: программно-конфигурируемая радиосистема; радиоприемник; электронная компонентная база отечественного производства; образовательная платформа; аналого-цифровой интерфейс.

Введение

Одним из актуальных направлений развития отечественной микроэлектроники является разработка программно-конфигурируемых радиосистем и их последующее внедрение в сферу телекоммуникаций [1]. Важной задачей при этом является применение комплектующих отечественного производства. Для этого необходимо мотивировать разработчиков переходить на ЭКБ ОП [2]. Для реализации этой задачи потребуются использование устройств с применением ЭКБ ОП в рамках образовательных программ высших учебных заведений, что поможет подготовить специалистов, которые в процессе дальнейшей работы будут отдавать предпочтение знакомой ЭКБ, с которой они уже имели опыт взаимодействия.

Рассматриваемые варианты реализации

Первым рассмотренным в статье вариантом реализации ПКР является приемник с применением 32-разрядного микроконтроллера (МК) K1986ВЕ92Q1 (ПКК «Миландр») с двумя встроенными АЦП, обеспечивающими частоту дискретизации до 0,5 Мвыб/сек каждый. Достоинства данного варианта заключаются в доступности для покупки как самих микросхем, так и отладочных комплектов к ним. Кроме того, данный МК аналогичен STM32, на основе которого существуют похожие проекты [3]. К недостаткам можно отнести низкую частоту дискретизации АЦП и, следовательно, маленькую аналоговую полосу.

Вторым рассмотренным в статье вариантом реализации будет вариант с использованием СБИС K1879ВЯ1Я (НТЦ «Модуль»). Данная СБИС имеет четыре АЦП с частотой дискретизации до 82 МГц каждый и большую по сравнению с предыдущим вариантом производительность. Недостатки заключаются в отсутствии в продаже отладочных комплектов и интерфейсе USB 2.0 Full Speed, так как его скорость ограничена 12 Мбит/сек, следовательно, передать всю оцифрованную полосу сигнала на ПК не получится.

Третьим рассмотренным вариантом является реализация с использованием СнК «Скиф» (НПЦ ЭЛВИС) и двух АЦП K5101НВ04F1 (ПКК «Миландр»). Достоинства такой реализации заключаются в наибольшей производительности и возможности передавать оцифрованные данные через высокоскоростной интерфейс USB 3.0. Недостатки заключаются в отсутствии микросхем для заказа и высокой стоимости конечного устройства по сравнению с предыдущими вариантами.

Важно отметить, что на данный момент для упрощения разработки не планируется использовать блоки цифровой обработки сигналов, имеющиеся в СБИС K1879ВЯ1Я и СнК «Скиф». Все указанные микросхемы используются для оцифровки сигнала и передачи его на ПК, где будет выполняться дальнейшая обработка в программе GNU Radio.

Литература

1. Савченко Е. М., Будяков А. С., Гаранович Д. И., Огурцова К. М. Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных приемо-передатчиков // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — С. 15–20. — EDN CPFQWD.
2. Углубление локализации производства электроники обсудили в Совете Федерации | Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации [Электронный ресурс]. — URL: <http://council.gov.ru/events/news/133620/> (дата обращения: 19.04.2023).
3. Простой цифровой радиоприемник на базе контроллера STM32G4 своими руками [Электронный ресурс]. — URL: <https://habr.com/ru/articles/588594/> (дата обращения: 07.08.2023).



УДК 004.052

Пример использования платформы программно-аппаратного ускорения верификации систем на кристалле

Солодовников А. П., Силантьев А. М., Переверзев А. Л.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
hepoh@org.miet.ru, silantiev@org.miet.ru, pal@olvs.miee.ru

Представлена методика конфигурации окружения для использования платформы ускорения верификации, а также пример ее использования. Проведена оценка производительности платформы в зависимости от версии интерфейса PCI-Express, сложности моделируемого устройства и числа передаваемых сигналов. Описаны рекомендации по эксплуатации платформы.

Ключевые слова: архитектура; верификация; Система на Кристалле; ПЛИС; SystemVerilog; DPI; PCI-E.

Увеличение степени интеграции систем на кристалле и цифровой аппаратуры обеспечило значительный рост производительности и расширение функциональных возможностей изделий, что привело к усложнению процесса их проектирования. Возросла значимость процесса верификации создаваемых изделий, на который может быть направлено более 50% ресурсов проекта [1]. Ускорение процесса верификации является актуальной задачей, для решения которой ведущие разработчики САПР создают специализированные программно-аппаратные комплексы, позволяющие воспроизводить функционирование RTL-описания аппаратуры с реальными тактовыми частотами до единиц МГц. Такие частоты обеспечивают на несколько порядков большую [2] скорость выполнения тестов, по сравнению с симуляцией. Эти устройства называются эмуляторами, и в связи со своей дороговизной могут использоваться только крупными компаниями. В то же время, важно отметить доступность инструментов маршрута проектирования для отдельных студентов, университетов, малых и средних компаний. Однако для использования полноценного маршрута проектирования не хватает инструментария для ускорения верификации.

В предыдущем докладе была представлена архитектура платформы ускорения верификации [3]. В ее основе лежит программная часть, связывающая окружение симулятора с аппаратурой посредством программного интерфейса DPI, а также аппаратный адаптер, отвечающий за обмен тестовыми воздействиями и выходными сигналами между тестируемым устройством и программной частью аппаратуры.

Данный доклад посвящен руководству по самостоятельной настройке и запуску платформы на базе IP-блока XDMA для плат Xilinx, начиная от установки операционной системы, ее настройки, установке дополнительного ПО, компиляции драйверов и заканчивая запуском моделирования посредством эмуляции в ПЛИС. Совместно с открытым репозиторием, содержащим исходные коды примера, это позволяет воспроизвести данную платформу всем желающим, у кого есть в наличии отладочные платы Xilinx, содержащие интерфейс PCI-E.

В докладе представлены результаты проведенной оценки производительности платформы для различных версий интерфейса PCI-E, числа передаваемых

сигналов и сложности моделируемого устройства, а также рекомендации по работе с платформой.

Литература

1. The Weather Report: 2018 Study On IC/ASIC Verification Trends [Электронный ресурс]. — URL: <https://semiengineering.com/the-weather-report-2018-study-on-ic-asic-verification-trends> (дата обращения — 11.08.21).
2. Pre-Silicon Verification Using Multi-FPGA Platforms [Электронный ресурс]. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1> (дата обращения — 11.08.21).
3. Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М. Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле // Известия вузов. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 4.



УДК 004.9

Особенности адаптивной обработки данных в информационно-управляющих системах

Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Си Ту Тант Син

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

yusm@rambler.ru

Рассмотрены особенности моделирования состояния технических устройств в целях разработки алгоритмов управления на основе адаптивной обработки данных в информационно-управляющих системах. Предложенные модели учитывают различные параметры и компоненты технических устройств, а также связи между ними.

Ключевые слова: адаптивный; обработка данных; информационно-управляющая система; нечеткие множества; кластеризация.

Введение

Современные информационно-управляющие системы (ИУС) обрабатывают огромное количество данных. Основной проблемой ИУС является низкая скорость формирования управляющего воздействия в условиях неопределенности внешних данных: подключаемых устройств, параметров окружающей среды и т. п. Одним из способов решения обозначенной проблемы является разработка моделей состояний технического устройства (ТУ), позволяющих адаптивно обрабатывать данные в ИУС в целях сохранения или достижения требуемого состояния ТУ.

Моделирование состояния технического устройства

Для обработки данных в ИУС используется кластеризация по признакам [1, 2]. Исходными данными, определяющими состояние ТУ, являются: тип и количество интерфейсов, параметры внешней среды, связи между ними. D — исходное пространство выделенных признаков, $h: D \rightarrow R$ — определяющий признак, $(D_1, \dots, D_n) \subset D$ — последовательность данных. При этом $\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists j \in \{1, \dots, n\}: D_i \neq D_j$; $\forall i \in \{1, \dots, n\}: \max\{h(D_i, D_k) | k \in \{1, \dots, n\}\} > 0$. Отношение эквивалентности $R_\gamma \subset \{D_1, \dots, D_n\}^2$ для $\gamma \in [0, 1]$ $(D_i, D_j) \in R_\gamma \Leftrightarrow \mu^{(k)}(i, j) \geq \gamma$ позволяет разбить множество данных $\{D_1, \dots, D_n\}$ на классы эквивалентности.

После кластеризации данных формируются условия возникновения, сохранения и переходов между состояниями ТУ. С учетом полученных условий строится модель состояний ТУ, имеющая иерархическую структуру.

$$\begin{cases} S_1: \{D_1, \dots, D_k\} \Rightarrow M_1 \\ \dots \\ S_i: \{D_1, \dots, D_m\} \Rightarrow M_i, \\ \dots \\ S_n: \{D_1, \dots, D_n\} \Rightarrow M_n \end{cases} \quad (1)$$

где S_i — состояние ТУ, M_i — иерархический уровень состояния, k, n, m — количество данных, описывающих состояние ТУ.

Заключение

Рассмотренная модель состояний ТУ позволяет разрабатывать алгоритмы адаптивной обработки данных для использования в ИУС, применение которых увеличит скорость формирования управляющего воздействия в условиях неопределенности внешних параметров. Адаптивность заключается в применении различных методов и средств обработки данных в зависимости от текущего и требуемого состояния ТУ. При этом не требуется обработка всего объема данных и для некоторых состояний обработка возможна с низким уровнем точности.

Литература

1. Шевнина Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Известия вузов. Электроника, 2022. — Т. 27. — № 3. — С. 407–415.
2. Шевнина Ю. С. Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода // Системы управления и информационные технологии, 2021. — № 3 (85). — С. 24–29.



УДК 621 396.96

Наземная обработка аппаратуры БРЛК на базе волоконно-оптической линии задержки

Былинкин И. К., Лось В. О.

АО «НИИ «Субмикрон»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

bylinkin@inbox.ru

Рассмотрены технические решения для наземной обработки аппаратуры бортового радиолокационного комплекса космического базирования. Решения позволяют проводить наземную обработку БРЛК в условиях, максимально приближенных к штатной эксплуатации БРЛК в объекте применения.

Ключевые слова: наземная обработка; бортовой радиолокационный комплекс; оптическая линия задержки.

Введение

Одним из самых универсальных способов получения изображений поверхности планеты является радиолокационное синтезирование апертуры [1]. Одним из ключевых факторов успеха разработки и изготовления космических бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК) является высокая степень наземной обработки БРЛК в целом и его составных частей в отдельности. Детальная проверка составных частей БРЛК значительно снижает риски возникновения ошибок при его комплексировании.

Разработка и изготовление БРЛК являются задачей, которую, как правило, выполняет большая кооперация предприятий, каждое из которых разрабатывает свою часть в рамках своей научно-производственной направленности [2]. Ответственными этапами создания БРЛК являются стыковка, первое включение и обработка всех его составляющих частей. Зачастую составные части, разработанные в рамках ТЗ на соответствующие СЧ ОКР и успешно прошедшие предварительные испытания, некорректно взаимодействуют в составе комплекса, что может быть обусловлено недостаточной проработкой системы верхнего уровня [3]. В целях минимизации рисков при сборке БРЛК в целом, а также для успешного изготовления его составных частей должна применяться специализированная наземная аппаратура, позволяющая принимать луч засетки от БРЛК и имитировать отраженный сигнал. Имитация сигнала должна учитывать параметры орбиты космического аппарата, в состав которого входит БРЛК. Формирование отраженного сигнала может осуществляться двумя способами. Первый — использование системы быстродействующих аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей с формированием задержки ответного импульса с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов. Второй заключается в аппаратном формировании отраженного сигнала с помощью выбора параметров линии задержки. Второй способ предпочтительнее из-за отсутствия паразитных воздействий, привнесенных самой системой формирования. Использование волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ) решает проблему затухания сигнала (0,2 дБ/километр у ВОЛЗ и 0,5 дБ/метр у качественных коаксиальных кабелей). ВОЛЗ имеет низкий уровень фазового шума и не ухудшает характеристики измерительной системы [4]. Использование ВОЛЗ позволяет создавать компактные и многофункциональные рабочие места для наземной

отработки БРЛК и его составных частей, значительно упрощает верификацию готовых изделий, помогает ускорить проведение этапа макетирования. Комплексы наземной отработки на базе ВОЛЗ хорошо масштабируются за счет использования ВОЛЗ различными параметрами и могут быть использованы для отработки БРЛК практически любого размера.

Заключение

Наземная отработка аппаратуры БРЛК на базе волоконно-оптической линии задержки является перспективным методом комплексного анализа функционирования и измерения параметров БРЛК. Использование ВОЛЗ при различных испытаниях БРЛК и его составных частей обеспечивает полноту проверок, снижает риск возникновения ошибок при комплексировании и в целом повышает надежность (за счет наземной отработки, близкой к отработке в составе космического аппарата) целевой работы БРЛК. Использование ВОЛЗ принесет и экономический эффект [5] в виде сокращения сроков выполнения работы из-за переноса большого количества проверок БРЛК на стадию изготовления его составных частей, что упростит заключительные стадии сборки и наладки БРЛК.

Литература

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиолокационные станции обзора Земли. Радиовидение. — М.: Радиотехника, 2005.
2. Заичко В. А., Селин В. А. Мероприятия Федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных // Вестник СибГАУ, 2013. — № 5 (51).
3. Технология сборки и испытаний космических аппаратов [Текст] / под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. — М.: Машиностроение, 1990. — 352 с.
4. Митяшев М. Б. К реализации технологий радиофотоники радиолокационных комплексов // Вестник СибГУТИ, 2015. — № 2.
5. Андреев И. А., Щеглов Д. К. Методика реализации проектов по улучшениям в системе менеджмента бережливого производства организации оборонно-промышленного комплекса // Международный открытый форум.



УДК 519.87

Моделирование выполнения сложных проектов на примере радиолокационного комплекса космического базирования

Кузнецова Е. С.^{1,2}, Орлов И. А.¹, Федюнина Е. А.¹, Чукин П. Е.¹,
Иванченко С. А.¹

¹АО «НИИ «Субмикрон»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
e.s.kuznetsova@inbox.ru

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Рассмотрен процесс моделирования выполнения работ по разработке радиолокационного комплекса космического базирования. Модель была разработана с использованием методов машинного обучения и обучена при помощи данных, полученных в результате прошлых разработок.

Ключевые слова: моделирование; радиолокационный комплекс космического базирования; машинное обучение.

Введение

При выполнении технически сложных проектов важную роль имеет этап моделирования. АО «НИИ «Субмикрон» более чем за тридцатилетнюю историю накопило опыт в разработке аппаратуры широкого спектра назначения, в том числе космической. Процесс разработки радиолокационного комплекса космического базирования (далее — РСА) [1] стал воплощением знаний, практического опыта, использования передового оборудования и современных технологий. По техническому заданию ключевые функциональные узлы РСА должны обладать рядом тактико-технических характеристик, также разрабатываемое изделие должно стать частью бортовой аппаратуры малых космических аппаратов в рамках проекта по созданию IT-системы экологического мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Моделирование выполнения проекта радиолокационного комплекса космического базирования

Существует множество методов оценки проектных работ, наиболее популярными являются метод экспертной оценки и метод оценки по аналогии; в связи с тем что в организации ранее не разрабатывались РСА, было принято решение произвести моделирование работ с помощью метода случайного леса — алгоритма, использующегося в машинном обучении, основа которого заключается в комбинировании множества деревьев решений, вычисления которых происходят параллельно и независимо друг от друга [2].

Обучающая выборка была составлена из всех ранее разработанных в АО «НИИ «Субмикрон» изделий, данные были получены из электронных структур изделий (ЭСИ) в соответствии с общероссийским классификатором изделий и конструкторских документов ОК 012-93 [3]. Были получены данные по каждой сборочной единице, включающие в себя информацию о количестве входящих сборочных единиц, количестве деталей и общем количестве листов документов, приведенных к формату А4.

Моделирование РСА стало возможным благодаря прошлым разработкам в области аппаратуры космического назначения. На основе разработанной структурной схемы деления были выделены основные функциональные узлы разрабатываемого РСА; таким образом, моделирование происходило для каждого модуля по отдельности.

Преимуществами метода моделирования можно считать устойчивость к переобучению, высокую точность, способность обрабатывать большие объемы данных. Модель была проверена на ранее разработанных технических проектах космического назначения, и фактическая ошибка составила 10% от общего количества разработанных документов [4]. Таким образом, был сделан вывод о достоверности информации, полученной в результате моделирования для разрабатываемого РСА.

Заключение

В результате проведенной работы была получена модель выполнения сложных проектов на примере РСА, были получены данные для оценки трудоемкости планируемой разработки. Полученные данные упрощают процесс проектирования и позволяют представить предварительную ЭСИ до этапа разработки рабочей конструкторской документации. С использованием разработанной модели возможно осуществлять достаточно точную оценку трудоемкости проектов до начала работ.

Литература

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. Верба В. С. — М.: Радиотехника, 2010. — 680 с.
2. Элбон Крис. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов: Пер. с англ. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. — 384 с. — ISBN 978-5-9775-4056-8.
3. ОК 012-93 Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов (классификатор ЕСКД).
4. Баранов А. О., Музыко Е. И., Павлов В. Н. Оценка эффективности инновационных проектов с использованием опционного и нечетко-множественного подходов. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2018. — 336 с.



УДК 004.056.5

Принципы организации информационной безопасности встраиваемых систем

Жариков А. М., Клоков В. А.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
amzharikov@mephi.ru*

Рассмотрены ключевые уязвимости встраиваемых систем. Исследованы особенности обеспечения информационной безопасности и приведены основные принципы проектирования архитектуры программного обеспечения таких систем с точки зрения защищенности и доверенности программного кода.

Ключевые слова: встраиваемые системы; Интернет вещей; информационная безопасность; тестирование на проникновение; встраиваемое программное обеспечение.

На сегодняшний день встраиваемые вычислительные системы находят широкое применение во всех сферах жизнедеятельности человека, начиная от автомобильной электроники и промышленной аппаратуры, заканчивая устройствами Интернета вещей и имплантируемыми медицинскими изделиями. Принимая во внимание, что вопросы обеспечения информационной безопасности компьютерных сетей и ЭВМ общего назначения активно исследуются и совершенствуются [1], встраиваемые системы зачастую плохо защищены и содержат большое количество уязвимостей как аппаратного, так и программного характера, что объясняется рядом факторов, отличающих подобные системы от компьютерных систем общего назначения [2].

Использование уязвимостей злоумышленниками направлено на нарушение целостности, конфиденциальности, доступности обрабатываемой устройством информации. Это, в свою очередь, может привести к ряду серьезных последствий, таких как: утечка персональных данных пользователей, утечка конфиденциальных данных компании — разработчика устройства, создание злоумышленником сетей для проведения атак типа «отказ в обслуживании» (DoS), причинение вреда жизни и здоровью пользователя и многое другое [3].

В работе были проанализированы направления возможных атак на встраиваемые системы и представлена их классификация по способу проникновения. Представленная классификация показана на рис. 1. Было рассмотрено каждое из направлений атаки, указаны способы ее осуществления и возможные последствия в случае успеха злоумышленника.

Для каждого обозначенного направления атаки предложены принципы организации защиты, направленные на минимизацию рисков компрометации встраиваемых систем злоумышленниками.

Для организации защиты на физическом уровне предложены среди прочего организация механизмов шифрования и проверки целостности памяти, использование аппаратных средств безопасной загрузки, защита либо отключение отладочных интерфейсов, использование схемотехнических средств защиты для противодействия атакам по сторонним каналам, представлены рекомендуемые настройки загрузчиков программного обеспечения.



Рис. 1. Классификация атак на встраиваемые системы

На сетевом уровне предложена безопасная организация архитектуры взаимодействия устройства с сервером, включающая в себя шифрование на канальном уровне с проверкой сертификатов, непосредственное шифрование данных при помощи симметричных или ассиметричных алгоритмов, организацию защиты от атак типа «отказ в обслуживании», представлены рекомендации по использованию и настройке брандмауэров.

На уровне программного обеспечения описаны предложения по организации защищенной программной архитектуры, включающие в себя параметры конфигурации используемых устройством операционных систем и способов шифрования, методы защиты исходного кода от обратной разработки, методы реализации доверенной доставки обновлений программного кода на устройства.

Атаки с использованием методов социальной инженерии в статье не рассмотрены подробно, однако даны обобщенные рекомендации по минимизации рисков реализации таких атак.

Применение описанных принципов в комплексе позволит повысить защищенность и доверенность систем. Приведенные рекомендации являются общими для всех видов встраиваемых систем. Окончательные меры обеспечения информационной безопасности должны рассматриваться для каждого типа устройств отдельно, с учетом различия их архитектур и доступных аппаратных ресурсов.

Литература

1. Cui Ang and Stolfo S. J. 2010. A quantitative analysis of the insecurity of embedded network devices: results of a wide-area scan // Proceedings of the 26th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 97–106. <https://doi.org/10.1145/1920261.1920276>.
2. Viega J. and Thompson H. The State of Embedded-Device Security (Spoiler Alert: It's Bad) // IEEE Security & Privacy. Vol. 10. № 5. Sept.—Oct. 2012 P. 68–70. DOI: 10.1109/MSP.2012.134.
3. Исхаков С. Ю., Исхаков А. Ю., Мещеряков Р. В. Концепция обеспечения безопасности встраиваемых вычислительных систем // Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2018): Материалы 5-й Всероссийской научно-технической конференции: в 2 томах, Ростов-на-Дону, 17–22 сентября 2018 года. Том 2. — Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2018. — С. 26–31. — EDN YQBQLR.



УДК 681.883.4

Обзор современной электронной базы, применимой при построении приемных трактов гидроакустических систем

к. т. н. Дегтярев А. А.¹, к. т. н. Мокрецов А. В.²¹ ООО НПЦ «Континент»

347900, г. Таганрог, ул. Большая бульварная, 13-11

degtyarev@kontinent-center.ru

² ООО «Аквазонд»

347900, г. Таганрог, ул. Большая бульварная, 13-19

a.mokretsov@aquazond.ru

Выделены три ключевые взаимосвязанные задачи, встающие перед инженером-электроником при разработке приемных трактов гидроакустических приборов. Дана характеристика этих задач. Рассмотрены примеры классов ЭКБ, применяемых при решении задач на этапах «чувствительность и разрешение», «фильтрация и удаление помех», «интеграция и обработка данных».

Ключевые слова: гидроакустические системы; приемные тракты; ЭКБ.

Активное исследование водных акваторий, проведение обслуживающих и монтажных подводных работ, обеспечение безопасности судоходства и охрана портовых территорий стимулируют развитие малоканальных гидроакустических систем ближнего действия. На сегодняшний день к представителям рассматриваемой категории гидроакустических систем относятся: эхолоты, гидролокаторы бокового обзора (ГБО), профилографы грунта, доплеровские лаги, акустические доплеровские профилографы течений (АДСТ) и др. Отметим, что в большинстве случаев для каждой конкретной практической задачи системы должны обладать уникальными тактико-техническими характеристиками [1].

На сегодняшний день одним из перспективных способов создания гидроакустической аппаратуры является такой подход, при котором роль аналогового приемного тракта сводится к «идеализированному» АЦП, который с бесконечным разрешением по времени и уровню обеспечит трансляцию принимаемых гидроакустической антенной сигналов в цифровую область. В цифровом домене на языках программирования высокого уровня могут быть организованы различные алгоритмы фильтрации, обработки и преобразования информации. Однако любой идеализированный подход имеет в реальной жизни ряд ограничений. В сложном и ответственном процессе по проектированию приемного тракта перед разработчиком, как правило, встают три взаимосвязанные задачи:

1) обеспечение заданной чувствительности и максимального динамического диапазона приемника, согласованного с рабочим напряжением и разрядностью выбранного АЦП (в дальнейшем будем называть этот этап «чувствительность и разрешение»);

2) обеспечение требуемой ширины полосы приема по частоте, согласованной с частотой дискретизации АЦП (в дальнейшем будем называть этот этап «фильтрация и удаление помех»);

3) обеспечение эффективной интеграции потока оцифрованных данных в другие части системы, например в подсистемы цифровой обработки данных

и подсистемы детектирования сигналов (в дальнейшем будем называть этот этап «интеграция и обработка данных»).

Наряду с упомянутыми выше техническими задачами, в процесс разработки вмешиваются как экономические факторы, так и факторы доступности покупки тех или иных ЭКБ на территории РФ.

В результате совместной работы специалистов ООО НПЦ «Континент» и ООО «Аквазонд» был обобщен имеющийся опыт разработки приемных трактов и проведен анализ предложений мирового рынка ЭКБ.

Для применения на этапе «чувствительность и разрешение» были рассмотрены альтернативы широко известным в российской схемотехнической традиции регулируемым усилителям на дискретных элементах, а именно:

- интегральные аналоговые регулируемые усилители (AD605, AD603, CLC5523, VCA821, AD8330, AD8331, 1432UB2, 1432UB3);
- усилители с программируемым или переключаемым коэффициентом усиления (AD8372, LMH6515, LTC6910, MAX3518, MAX9939, MCP6S91);
- компрессоры сигналов, логарифмические усилители и детекторы (TL441, LOG101, AD8307, AD8310).

Для применения на этапе «фильтрация и удаление помех»:

- переключаемые и перестраиваемые фильтры (LTC1564, LTC1064-7, LTC1066-1, LTC6602, LTC1043, MAX260/261/262, MAX7418-7425, 1478ФУ1Т, 1478ФН1У);
- интегральные смесители (НА-2556, ADL5391, AD834, AD734, AD539, 526ПС1, 140МА1).

Для применения на этапе «интеграция и обработка данных» рассмотрены:

- аналого-цифровые преобразователи (AD4030, AD7134, AD4110, AD7175, AD7760, ADS131, LTC2512, MCP3911, TLV320ADC3120);
- аналоговые и аналого-цифровые фронтенды для ультразвукового ободования (TDC1000, AD9721, AD9674, AFE5801, AFE5808, MAX2078, 1273ПВ19Т).

В отдельную группу были выделены различные интегральные схемы, выпускаемые в КНР, по всей видимости, для внутреннего рынка (СВМ8621, СВМ1117, СВМуD1200, СВМ99D57, СВМ79AD60G, СВМ92AD68, BL8028, BL7120, BL7140, BL1590, KY5532BS, ES7243, MS8605/8606, MS5182N/MS5189N, MS1030, MS2201, ZYL2245).

Очевидно, что в условиях санкционной политики коллективного Запада многие компоненты становятся недоступными, что ставит новые вызовы перед российской микроэлектроникой.

Литература

1. Дегтярев А.А. Разработка инвариантного ядра программного обеспечения гидроакустических информационных систем // VIII Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Тезисы докладов (11–26 апреля 2012 г., г. Ростов-на-Дону). — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. — С. 123–125.

УДК 53.087.04: 621.793.1: 546.1/681

Технология формирования гетероструктур Ga(Al)N на кубическом карбиде кремния на кремнии (3C-SiC/Si) методом МОГФЭ

Федотов С. Д.^{1,3}, Заварин Е. Е.², Сахаров А. В.², Цацульников А. Ф.²,
Бабаев А. В.¹, Стаценко В. Н.³, Кукушкин С. А.⁴, Гращенко А. С.⁴,
Редьков А. В.⁴

¹ ООО «ОНСИ»

г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2

fedotov.s.d@yandex.ru

² НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

lundin@vpegroup.ioffe.ru

³ АО «Эпиэл»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2

fedotov@epiel.ru

⁴ Институт проблем машиноведения РАН

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., Большой просп., 61

В докладе показаны актуальные результаты разработки опытной технологии формирования гетероструктур Ga(Al)N на темплейтах (спецподложках) кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si) с помощью метода МОГФЭ. Получены первые в РФ гетероструктуры типа Ga(Al)N/3C-SiC/Si диаметром 100 мм с электрофизическими характеристиками на уровне аналогов на кремнии (GaN/Si), превышающие данный уровень (подвижность электронов — до 1730 см²/(В·с)). Показаны первые результаты испытаний тестовых СВЧ-транзисторов на разработанных гетероструктурах Ga(Al)N/3C-SiC/Si.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; МОС-гидридная эпитаксия; МОГФЭ; III-N; нитрид галлия; GaN; карбид кремния; SiC; 3C-SiC; транзисторы; НЕМТ; кремний; Si.

Технология транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе GaN на кремнии в последние десятилетия была определена как многообещающая платформа для разработки высокочастотных телекоммуникационных систем и систем управления питания. Наличие подложек Si большого диаметра с низкой себестоимостью позволяет прогнозировать скорую интеграцию данной платформы в массовое производство потребительской электроники. На данный момент трудности, связанные с ростом материалов с высокой несогласованностью решеток и большой термоупругой деформацией, были преодолены с помощью буферных конструкций на основе (Al,Ga)N, выращенных на начальном слое AlN/Si. Однако в ряде научных работ сообщалось о паразитной диффузии примесей металлов III группы в кремниевую подложку и образовании инверсионного проводящего слоя на границе раздела AlN/Si [1, 2]. Это приводило к увеличению паразитной проводимости и появлению потерь при работе СВЧ-транзисторов на основе подобных гетероструктур [3]. Кроме того, технологичность проведения процесса металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) III-нитридов на кремнии крайне

затруднена по причине разрушения поверхности Si при взаимодействии с атомами Ga. В этой связи использование слоя кубического карбида кремния (3C-SiC) как промежуточного слоя в процессе МОГФЭ GaN на Si является достаточно перспективным решением сложившейся технологической проблемы.

Формирование промежуточного слоя 3C-SiC на кремнии обладает рядом преимуществ: SiC обладает очень низкой реакционной способностью с различными элементами, используемыми при выращивании нитридов, что облегчает подготовку подложки и образование зародышей [4]. Кроме того, в некоторых случаях положительный прогиб пластины, инициированный ростом SiC на Si(111), может уравновесить отрицательный прогиб подложки Si, возникающий вследствие роста AlGaN с деформацией сжатия на слоях AlN. Потенциальное преимущество темплейтов 3C-SiC/Si было продемонстрировано с помощью слоев GaN толщиной до 2 мкм без трещин, выращенных с довольно простой структурой буферного слоя в работах [5–6] с помощью метода МОГФЭ.

Эпитаксиальный рост Ga(Al)N-гетероструктур на темплейтах 3C-SiC/Si диаметром 100 мм производился на опытно-промышленной МОГФЭ-установке Dragon-125. Горизонтальный эпитаксиальный реактор данной установки обладает уникальным дизайном, позволяющим наращивать Ga(Al)N-соединения с высокой скоростью. В качестве темплейтов 3C-SiC/Si(111) использованы структуры, полученные методом замещения атомов в ИПМаш РАН (г. Санкт-Петербург) [7–8]. Проведены разработка и оптимизация базовой технологии формирования транзисторных гетероэпитаксиальных структур GaN на подложке кубического карбида кремния на кремнии. Проведены исследования электрофизических свойств выращенных гетероструктур с помощью измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Подвижность электронов для некоторых образцов доходила до $1730 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при R_s 260 Ом/кв, в среднем не хуже аналогичных гетероструктур GaN/Si, полученных при схожих условиях роста. Получены первые результаты измерений параметров тестовых транзисторов НЕМТ (изготовлены в НИУ МИЭТ, г. Зеленоград) на данных гетероструктурах Ga(Al)N/3C-SiC/Si. Для тестового транзистора с шириной затвора 100 мкм ток насыщения составил 92 мА, крутизна — около 300 мС/мм, G_{max} при 2 ГГц — 19,5 дБ, при 10 ГГц — 14 дБ, пробивное напряжение — больше 100 В.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, соглашение №30ГТС2РЭС1472138 от 24.12.2021

Литература

1. Yacoub H., Fahle D., Finken M., Hahn H., Blumberg C., Prost W., Kalisch H., Heuken M., Vescan A. // *Semicond. Sci. Technol.*, 2014. 29, 115012.
2. Chandrasekar H., Uren M. J., Casbon M. A., Hirshy H., Eblabla A., Elgaid K., Pomeroy J. W., Tasker P. J., Kuball M. // *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2019. 66, 1681.
3. Berber F., Johnson D. W., Sundqvist K. M., Piner E. L., Huff G. H., Harris H. R. // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2017. 65, 1465.
4. Cordier Y., Semond F., Massies J., Leroux M., Lorenzini P., Chaix C. // *J. Cryst. Growth* 301/302 (2007) 434.
5. Cordier Y., Portail M., Chenot S., Tottereau O., Zielinski M., Chassagne T. // *J. Cryst. Growth* 310 (2008) 4417.
6. Liaw H. M., Venugopal R., Wan J. and Melloch M. R. // *Solid-State Electron.* 45, 1173 (2001).



7. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (Обзор) // Журнал общей химии, 2022. — Т. 92. — № 4. — С. 547–577.
8. Kukushkin S., Osipov A. and Redkov A. SiC/Si as a New Platform for Growth of Wide-Bandgap Semiconductors // *Advanced Structured Materials*, 2022. P. 335–367.

УДК 53.087.04: 621.793.1: 546.1/681

Гетероструктуры Ga(Al)N на сверхвысокоомном эпитаксиальном кремнии диаметром 150 мм для СВЧ и силовой электроники

Федотов С. Д.¹, Заварин Е. Е.², Сахаров А. В.², Цацульников А. Ф.²,
Соколов Е. М.¹, Стаценко В. Н.¹

¹ АО «Эпиэл»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
fedotov@epiel.ru

² НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
lundin@vpegroup.ioffe.ru

В докладе представлены актуальные результаты разработки опытно-промышленной технологии изготовления гетероэпитаксиальных структур Ga(Al)N на подложках Si(111) диаметром до 150 мм со сверхвысокоомным (1500–5000 Ом·см) эпитаксиальным слоем кремния для СВЧ-техники и силовой электроники. Получены опытные образцы гетероструктур диаметром 150 мм с высокой подвижностью носителей заряда в канале 2DEG (более 1600 см²/(В·с)). Показаны результаты тестирования GaN НЕМТ-транзисторов, изготовленных по технологическим маршрутам различных производителей.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; МОС-гидридная эпитаксия; МОГФЭ; III-N; нитрид галлия; GaN; транзисторы; НЕМТ; кремний; Si.

Достижение широкого распространения электроники на основе GaN требует достаточно низкой себестоимости производимых устройств. Одним из способов снижения затрат на изготовление является использование более дешевых подложек большого диаметра. В настоящее время наиболее подходящим материалом для решения данных задач является подложка монокристаллического кремния. Такие подложки обладают небольшой стоимостью: их цена составляет около 1/10 от цены сапфировой подложки и около 1/100 от цены подложки 4Н- или 6Н-SiC [1]. Кроме того, прогнозируется, что некоторое устаревшее оборудование для обработки кремниевых структур по технологии КМОП может быть перепрофилировано для создания приборов на гетероструктурах GaN/Si [2].

Формирование эпитаксиального GaN на Si является крайне сложной задачей из-за различных параметров сопрягающихся материалов — значительного несоответствия параметров решетки (18%) и большого несоответствия коэффициентов теплового расширения (46%). Более того, GaN и содержащие Ga растворы Al_xGa_{1-x}N нельзя выращивать непосредственно (напрямую) на кремнии, поскольку галлий химически взаимодействует с кремнием при повышенных температурах на начальной стадии роста [3]. Помимо этого, существует ряд проблем, непосредственно связанных с исходным материалом подложки Si. Например, в работе [4] исследовано прохождение паразитной проводимости подложки в гетероструктурах GaN НЕМТ, выращенных методом МОГФЭ на высокоомных подложках кремния. Обнаружено, что сразу после высокотемпературной стадии отжига естественного окисла Si происходит существенное снижение удельного сопротивления кремниевой подложки и образование паразитной проводимости в случае использования



подложки, полученной методом Чохральского (CZ). В то же время кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки (FZ), по своей природе имеет более низкий уровень кислорода и может обеспечить лучшую устойчивость к тепловому выделению объемных доноров в объеме подложки Si. Однако отсутствие технологии роста подложек Si FZ диаметром более 100 мм в РФ и их высокая стоимость (сравнимая со SiC) в настоящее время ограничивают применение данного материала для промышленного производства GaN HEMT для СВЧ-изделий. В связи с этим АО «Эпиэл» предлагает в качестве альтернативы использование уникальных сверхвысокоомных эпитаксиальных структур кремния. Ранее проведенные технологические работы показали возможность применения данного материала для получения силовых GaN HEMT-гетероструктур [5, 6].

Эпитаксиальный рост гетероструктур Ga(Al)N/Si производился на МОГФЭ-установке Dragon-125. Горизонтальный реактор с индуктивным нагревом позволяет наращивать Ga(Al)N-соединения с высокой скоростью: продолжительность процесса для HEMT-структур на Si составляет 1,5–2,5 ч [7]. Гетероструктуры были сформированы на сверхвысокоомных структурах кремния с удельным сопротивлением слоя Si > 2 кОм·см на подложках марки КДБ-10 диаметром до 150 мм. Измеренная методом Ван дер Пау подвижность электронов в 2DEG-канале для тестовых структур достигала $1600 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (300 K) и более при средней концентрации носителей заряда более $1,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ и Rs около 300 Ом/квadrat.

Произведено приборное технологическое опробование разработанных гетероструктур GaN/Si тремя различными производителями: АО «НПП Салют» (Н. Новгород), ФГУП «РНИИРС» (Ростов-на-Дону) и АО «ЗНТЦ» (Зеленоград). На гетероструктурах диаметром до 150 мм были получены тестовые СВЧ-транзисторы с максимальным током стока насыщения 1200 мА/мм, крутизной транзисторов не менее 300 мСм/мм, напряжением обратного пробоя более 50 В и граничной частотой (Ft) около 80 ГГц. Гетероструктуры для тестовых силовых транзисторов характеризовались напряжением вертикального пробоя около 400 В.

Литература

1. Dadgar A. et al. MOVPE growth of GaN on Si (111) substrates // *Journal of Crystal Growth*, 2003. Vol. 248. P. 556–562.
2. Zhu D. et al. GaN-based LEDs grown on 6-inch diameter Si (111) substrates by MOVPE // *SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices*. International Society for Optics and Photonics, 2009. P. 118–723.
3. Morkoç H. General properties of nitrides // *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices: Materials Properties, Physics and Growth*, 2008. Vol. 1. P. 1–129.
4. Ghosh S. et al. Origin(s) of anomalous substrate conduction in MOVPE-grown GaN HEMTs on highly resistive silicon // *ACS Appl. Electr. Mater.*, 2021. Vol. 3. P. 813–824.
5. Федотов С. Д. и др. Гетероэпитаксия Ga(Al)N для силовых HEMT на сверхвысокоомных структурах кремния // *Наноиндустрия*, 2020. — № S5–1 (102). — Т. 13. — С. 209–212.
6. Федотов С. Д. и др. Использование сверхвысокоомных эпитаксиальных структур кремния диаметром до 150 мм для роста Ga(Al)N-соединений методом МОГФЭ // *Наноиндустрия*, 2021. — № S7–14 (107). — Т. 14. — С. 197–200.
7. Лундин В. В. и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // *Научное приборостроение*, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.

УДК 621.382

Получение и исследование III-нитридных НЕМТ-гетероструктур с ультратонким барьером AlN

Гусев А. С., Шостаченко С. А., Горелов А. А., Добров А. В., Ключков А. Н., Кузнецов А. Л., Номоев С. А., Рындя С. М., Тертышная Ю. А., Каргин Н. И.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ASGusev@mephi.ru

Методом МЛЭ с плазменной активацией азота получены III-нитридные НЕМТ-гетероструктуры, содержащие ультратонкий барьер AlN. Исследовано влияние режимов роста нуклеационного и буферного слоев на кристаллическое качество, морфологию поверхности и электрофизические свойства экспериментальных образцов.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; GaN; ультратонкий AlN-барьер; гетероструктура; электронный транспорт; 2D электронный газ.

Введение

III-нитридные НЕМТ-гетероструктуры — это основа для формирования мощной СВЧ электронной компонентной базы. В настоящее время известно много вариантов AlIn гетероэпитаксиальных структур (ГС) с 2D электронным газом. Наиболее распространенными и изученными являются ГС с барьерным слоем на основе тройных соединений. Альтернативу им ввиду ряда преимуществ (низкое слоевое сопротивление и подавление короткоканальных эффектов) могут составить ГС с ультратонким барьером AlN [1–5]. Рекордные значения $\rho_s = 120\text{--}130 \text{ Ом}/\square$ получены авторами [3, 5] именно для таких структур. Поэтому целью работы были получение и исследование ГС с ультратонким AlN-барьером, включая изготовление тестовых СВЧ-транзисторов, измерение их параметров и характеристик.

Экспериментальная часть

Экспериментальные ГС, содержащие ультратонкий барьер ($\approx 5 \text{ нм}$), выращивали в установке GEN 930 (Veeco), оснащенной азотно-плазменным активатором. Мощность ВЧ-плазмы и поток азота составляли 350 Вт и 1,6 стандартных кубических сантиметров в минуту соответственно. Параметры формирования нуклеационного и буферного слоев варьировались от образца к образцу в целях оптимизации режимов роста. Нуклеационный слой AlN толщиной 40 нм формировался в обогащенных азотом условиях ($F_{\text{Al}}/F_{\text{N}} \sim 0,6$) при стационарном потоке алюминия. При выращивании буферного GaN-слоя толщиной 1500 нм в стабилизированных азотом условиях применялась ММЕ-методика ($t_1 = 8 \text{ с}$; $t_{II} = 14 \text{ с}$). Затем при стационарных условиях в течение 45 с формировался AlN-барьер ($\approx 5 \text{ нм}$). Слоеое сопротивление оптимизированных ГС составило менее 230 Ом/ \square , удельное сопротивление буферного GaN слоя равнялось $\sim 10^8 \text{ Ом}/\square$, плотность прорастающих дислокаций — $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (по данным XRD), шероховатость поверхности составляла $\leq 0,7 \text{ нм}$.

Результаты и их обсуждение

На основе экспериментальных ГС были изготовлены тестовые СВЧ-транзисторы с затвором Шоттки ($L_g = 150 \text{ нм}$). Измерения статических ВАХ осуществлялись с помощью анализатора полупроводниковых приборов B1500A (Agilent/Keysight)



и зондовой станции EP6 (Cascade Microtech). Анализ характеристик изготовленных приборов показал, что они имеют максимальный ток насыщения стока до 1,4 А/мм (при $U_{GS} = +2,5$ В), крутизну характеристики G_M до 330 мСм/мм и сопротивление в открытом состоянии $R_{on} = 2,8$ Ом·мм.

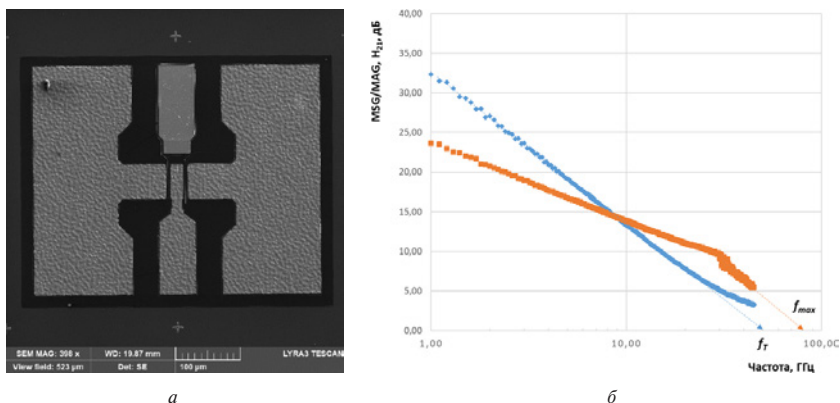


Рис. 1. Изображение топологии тестового транзистора (а); частотные зависимости коэффициента усиления по мощности (MAG/MSG) и коэффициента усиления по току ($|h_{21}|$) (коричневые и синие маркеры соответственно) (б)

Для анализа работоспособности транзисторов в СВЧ-диапазоне выполнялись измерения S-параметров экспериментальных структур в их двухзатворном исполнении с $Wg = 2 \cdot 50$ мкм (рис. 1а). Измерения осуществлялись с помощью векторного анализатора PNA-X N5247A (Agilent) и зондовой станции PM8 (Cascade Microtech) в диапазоне частот от 100 МГц до 45 ГГц. Оценка предельных частот усиления по току f_t и мощности f_{max} привела к значениям 50 и 80 ГГц соответственно (рис. 1б). Усиление на частоте 20 ГГц составило 11–12 дБ.

Литература

1. Meyer D.J. et al. High electron velocity submicrometer AlN/GaN MOS-HEMTs on freestanding GaN substrates // IEEE Electron Device Letters, 2013. Vol. 34. № 2. P. 199–201.
2. Xue J.S., Zhang J.C., Hao Y. Ultrathin barrier AlN/GaN high electron mobility transistors grown at a dramatically reduced growth temperature by pulsed metal organic chemical vapor deposition // Appl. Phys. Lett., 2015. Vol. 107. I. 4. article ID 043503.
3. Cao Y., Wang K., Li G., Kosel T., Xing H., Jena D. MBE growth of high conductivity single and multiple AlN/GaN heterojunctions // Journal of Crystal Growth, 2011. Vol. 323. I. 1. P. 529–533.
4. Harrouche K., Kabouche R., Okada E. and Medjdoub F. High Performance and Highly Robust AlN/GaN HEMTs for Millimeter-Wave Operation // IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2019. Vol. 7. P. 1145–1150.
5. Chang C. Y. et al. Very low sheet resistance AlN/GaN high electron mobility transistors // Proc. CS MANTECH Conference, 2009. P. 18–21.

УДК 621.382.323

Двухканальные гетероструктуры для мощных полевых транзисторов

Богданов С. А., Карпов С. Н., Пашковский А. Б.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

solidstate10@mail.ru

Теоретически исследованы двухканальные транзисторные гетероструктуры различных конструкций. Анализ результатов работы выявил возможность увеличения удельной выходной мощности двухканальных транзисторов до 3–4 Вт/мм при коэффициенте усиления на 3–4 дБ больше, чем у транзистора на основе DpHEMT.

Ключевые слова: полевой транзистор; GaAs-гетероструктура; Q-DCrHEMT; цифровые барьеры; двухканальная гетероструктура.

Введение

Поверхностная плотность электронов (ППЭ) в каналах традиционных GaAs-гетероструктур (DpHEMT) составляет около $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, при этом удельная выходная мощность P транзисторов на их основе составляет 1–1,2 Вт/мм. В целях повышения P и коэффициента усиления K_v в 2012 г. был создан новый тип транзисторных гетероструктур — гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [1]. Транзисторы на DA-DpHEMT продемонстрировали увеличение P до 1,8 Вт/мм, а также рост малосигнального K_v на 3–4 дБ [2]. Транспортные свойства DA-DpHEMT-гетероструктур удалось существенно улучшить за счет введения дополнительных цифровых потенциальных барьеров (ЦПБ) из AlAs/GaAs короткопериодных сверхрешеток вокруг легированных областей (Q-DpHEMT) [3]. В Q-DpHEMT была достигнута ППЭ $4,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при сохранении высокой подвижности электронов [4]. Однако для кратного увеличения ППЭ без существенного снижения K_v остается, по-видимому, всего один путь — увеличение количества каналов в транзисторной гетероструктуре.

В работе рассмотрены различные конструкции двухканальных транзисторных гетероструктур (ДТГ) и проведен анализ результатов теоретических исследований влияния поперечного пространственного переноса электронов на всплеск дрейфовой скорости электронов (ВДСЭ) в этих структурах. Наилучшие результаты по величине ВДСЭ и локализации электронов в каналах получены для конструкции ДТГ с донорно-акцепторным легированием и ЦПБ (Q-DCrHEMT).

Особенности конструкции Q-DCrHEMT и результаты расчетов

В конструкцию Q-DCrHEMT включены три короткопериодные сверхрешетки (КС) AlAs/GaAs с толщинами 3 ML/4 ML соответственно. Конструкция Q-DCrHEMT-гетероструктуры может быть описана со стороны затвора к подложке следующим образом: широкозонный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ — КС AlAs/GaAs (шесть периодов) — канал $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{As}$ — КС AlAs/GaAs (четыре периода) — канал $\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{As}$ — КС AlAs/GaAs (6 периодов) — широкозонный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. ППЭ в каждом канале составляет $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. По два легированных донорами δ -слоя со стороны подложки и затвора расположены между AlAs-барьерами той же толщины, что и остальные.



Со стороны подложки введено дополнительное акцепторное легирование, со стороны затвора акцепторы предлагается не вносить.

Расчеты нелокальной динамики электронов в Q-DCrHEMT-гетероструктуре производились по модели, представленной в [3]. Расчеты показали, что в Q-DCrHEMT может быть достигнута суммарная ППЭ $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, при этом ВДСЭ не сильно отличается от теоретического предела для данной модели. С учетом результатов работ [1–4] для транзисторов на основе Q-DCrHEMT простые оценки позволяют ожидать P на уровне 3–4 Вт/мм при K_v на 3–4 дБ выше, чем у транзисторов на основе DpHEMT.

Заключение

По теоретическим оценкам, удельные мощности транзисторов на гетероструктурах с двойным каналом могут достигать 3–4 Вт/мм, однако из-за тепловых эффектов без изменения конструкции транзисторов (увеличения расстояния между пальцами, уменьшения толщины подложки до 25 мкм, переноса гетероструктуры транзистора на подложку с более высокой, чем у GaAs, теплопроводностью, например кремниевую) это возможно только в импульсных режимах и режимах с высоким КПД.

Литература

1. Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Лапин В. Г., Соколов А. Б. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в журнал технической физики, 2012. — Т. 38. — № 17. — С. 84–89.
2. Борисов А. А., Пашковский А. Б., Лукашин В. М., Лапин В. Г., Щербаков С. В., Маковецкая А. А., Журавлев К. С., Торопов А. И. Анализ малосигнальных СВЧ характеристик DA-HEMT // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника, 2016. — № 1. — С. 65–69.
3. Пашковский А. Б., Богданов С. А., Бакаров А. К., Журавлев К. С., Лапин В. Г., Лукашин В. М., Карпов С. Н., Рогачёв И. А., Терёшкин Е. В. // физика и техника полупроводников, 2023. — Т. 57. — Вып. 1. — С. 21–28.
4. Pashkovskii A. B. et al. // IEEE Trans. On Electron Devices, 2021. Vol. 68. № 1. P. 53.

УДК 47.13.11

Моделирование процессов формирования GaN НЕМТ-структуры на оборудовании кремниевой технологии на пластинах диаметром 200 мм**Полушкин Е. А., Дорофеев А. А., Баранов Г. В., к. ф.-м. н., Маркин А. В.**
*АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1*

Сформирован проект маршрута изготовления силовых GaN-транзисторов, особенностью которого является применение только технологических операций, используемых в кремниевом производстве. На оборудовании кремниевой технологии выполнены операции в целях определения их пригодности для формирования GaN НЕМТ.

Ключевые слова: технология GaN; НЕМТ; GaN-on-Si.

По оценкам различных маркетинговых агентств, в ближайшее десятилетие мировой рынок силовых GaN-устройств будет расти со среднегодовым темпом роста от 40,3 до 57,4%, в основном за счет роста применения силовых компонентов на основе GaN в электрических транспортных средствах, в устройствах беспроводной зарядки, в бытовой электронике, в центрах обработки данных и базовых телекоммуникационных станциях [1, 2].

В отличие от СВЧ GaN-устройств, где характеристики приборов имеют ключевое значение, для силовых GaN-устройств не менее важна их стоимость. Создать качественный недорогой продукт возможно только путем изготовления больших объемов изделий на относительно дешевых гетероструктурах, выращенных на кремниевых пластинах диаметром 200 мм. Процент выхода годных таких изделий должен быть не ниже 95%, что уверенно достигнуто в современном кремниевом производстве.

Мировой опыт показывает возможность изготовления эпитаксиальных GaN-гетероструктур на кремниевых пластинах стандартной толщины диаметром 200 мм, соответствующих требованиям промышленного производства. Конструкция силовых GaN-устройств допускает применение стандартных материалов кремниевой технологии, таких как Al, Ti, TiN, SiNx, SiO₂ [3, 4], и формирование топологических элементов методом травления позволяет отказаться от использования золота и взрывной литографии.

Были определены ключевые технологические моменты, требующие экспериментального опробования.

Формирование омических контактов в GaN НЕМТ-структурах требует создания слоистой структуры Ti/Al/TiN со строго выдержанными толщинами слоев и ее плазмохимического травления до нижележащего тонкого диэлектрического слоя. Процесс травления должен обеспечить полное удаление металла. Перетрав диэлектрического слоя недопустим, т.к. гарантированно разрушит эпитаксиальную гетероструктуру.

Толщины технологических слоев в конструкции GaN-транзистора отличаются от значений, используемых в кремниевых изделиях. Поэтому необходимо определить возможность формирования таких слоев технологическими приемами кремниевой технологии. Для определения пригодности оборудования,



используемого в кремниевом производстве, для технологии GaN были использованы кремниевые пластины, на которые наносились технологические слои с требуемыми параметрами, определялись их характеристики — толщина и коэффициенты преломления для диэлектриков (эллипсометрия), а для металлических слоев — толщина и поверхностное сопротивление. Для отработки процессов плазмохимического травления были сформированы слоистые металлические структуры Ti (75 Å) / Al (4700 Å) / TiN (450 Å) (PVD) на диэлектрическом слое SiN_x (2000 Å) (PECVD). Плазмохимическое травление производилось через фоторезистивную маску, для нахождения оптимального режима травления варьировалось время цикла «дотравливания», длительность основного цикла определялась автоматически по системам контроля параметров процесса. Протравленные структуры анализируются методами электронной микроскопии.

Результаты анализа и измерений параметров исследуемых технологических слоев и процессов показали, что примененное для моделирования оборудование кремниевой технологии может быть использовано для изготовления системы омических контактов силовых GaN-транзисторов.

Однако оборудование кремниевого производства не полностью перекрывает потребности технологии GaN. Требуется создание специализированного оборудования, такого как установка БТО для формирования омических контактов, установка прецизионного травления GaN (ПХТ).

Литература

1. Power GaN 2019: Epitaxy, Devices; Applications and Technology 2019 / [сайт организации YOLE Development]. URL: <https://www.yolegroup.com/press-release/power-GaN-the-next-wave> (дата обращения: 13.04.2023).
2. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5. EDN JXZUBV.
3. Garbe V., Weise J., Münchgesang W. et al. Au-free ohmic Ti/Al/TiN contacts to UID n-GaN fabricated by sputter deposition // Journal of Applied Physics, 2017. Vol. 121. № 6. P. 065703. DOI: 10.1063/1.4975485. EDN YXSMKR.
4. Sun R., Liang Y.C., Yeo Y.C., Zhao C. Au-Free AlGaIn/GaN MIS-HEMTs with Embedded Current Sensing Structure for Power Switching Applications // IEEE Transactions on Electron Devices, 2017. Vol. 64. № 8. P. 3515–3518. DOI: 10.1109/TED.2017.2717934. EDN YGIXWP.

УДК 538.915

Спин-инжекционное ТГц-излучение в магнитных нанопереходах. 20 лет спустяПанас А. И.¹, Чигарев С. Г.², Вилков Е. А.², Бышевский-Конопко О. А.²,
Загорский Д. Л.³, Долуденко И. М.³¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
airpanas@istokmw.ru² Фрязинский филиал ФГБУН ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

³ ФНИИ «Кристаллография и фотоника» РАН

119333, г. Москва, Ленинский просп., 59

Рассматривается спин-инжекционный механизм формирования ТГц-излучения в магнитных нанопереходах. Обсуждаются физические основы формирования излучения и его нетепловая природа. Демонстрируются конструкции излучателей. Подводится итог 20-летних исследований этого явления.

Ключевые слова: спиновая инжекция током; магнитные нанопереходы; ТГц-излучение.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к ТГц-диапазону частот. Освоение его сдерживается отсутствием на практике компактных и простых в работе источников и эффективных приемников (детекторов) ТГц-излучения. Поэтому актуальными являются поиски новых принципов формирования ТГц-излучения и реализация на их основе конструкций излучателей. В этой связи вызывают интерес эффекты, наблюдаемые при спиновой инжекции током в магнитных нанопереходах и исследуемые уже на протяжении 20 лет.

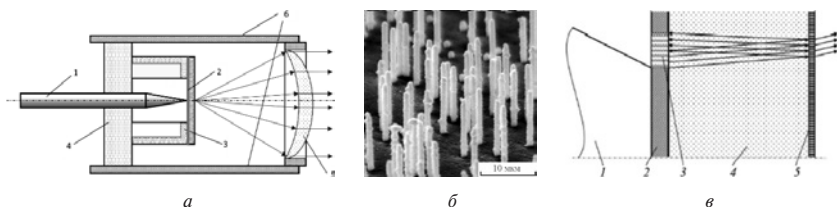
Предложенные и реализованные конструкции спин-инжекционных излучателей

Рис. 1. Излучатель со структурой «стержень — пленка» [1]: 1 — ферромагнитный стержень (Fe) с диаметром острия 10–30 мкм, 2 — наноразмерная пленка антиферромагнетика (30–50 нм), 3 — держатель подложки, 4 — диэлектрическая опора излучателя, 5 — фокусирующая линза, 6 — держатель линзы (а); нанопроволоки (десятьки нанометров), заполненные на 50% Fe и на 50% Ni и используемые в излучателе [2–3] (б); излучатель с резонатором на выходе [4]: 1 — стержень, 2 — наноразмерная пленка FeMn, 3 — излучающая область, 4 — высокоомный кремний толщиной 0,5 мм, 5 — полупрозрачное зеркало из немагнитного слоя титана (толщина 10–15 нм) (в)

Основные принципы формирования спин-инжекционного ТГц-излучения

Спин-инжекционный излучатель образован как минимум двумя контактирующими друг с другом магнитными нанослоями с существенно различными магнитными свойствами (например, ферромагнетик и антиферромагнетик с разными намагниченностями M_1 и M_2). Через образованный таким образом магнитный переход пропускают ток большой плотности. Первый по пути тока слой выполняет функцию инжектора. Он спин-поляризует ток, который поступает во второй контактирующий слой. Из-за различия намагниченности слоев в M_2 нарушается равновесное спиновое состояние и в каждой из спин-энергетических подзон образуются квазиуровни Ферми e_{F+} и e_{F-} , разнесенные по энергии относительно равновесного уровня Ферми e_{F0} (рис. 2). Часть электронов, спины которых параллельны M_2 , переходят на более низкие энергетические уровни с отдачей энергии $\Delta\epsilon$, без изменения спиновой ориентации. Электроны, спины которых оказываются антипараллельными M_2 , увеличивают свою энергию, переходя на более высокие энергетические уровни и становясь энергетически возбужденными. Они способны совершать межзонные спин-флип переходы, изменяя спиновую ориентацию с излучением кванта энергии, определяемой энергетической щелью между квазиуровнями Ферми.

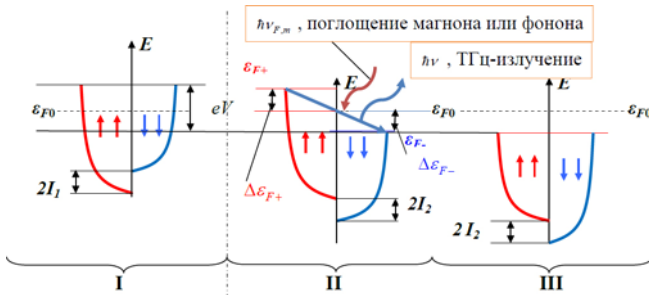


Рис. 2. Энергетические электронные зоны. Область I — для инжектора M_1 , область II — для неравновесных электронов в пленке M_2 , область III — для равновесных электронов в пленке с M_2

Такой сложный механизм формирования излучения подтверждают экспериментальные результаты на рис. 3а, полученные при плавном изменении тока, пропускаемого через магнитный переход.

В спин-инжекционных излучателях сигнал наблюдается в диапазоне частот 3–30 ТГц, который частично совпадает с максимумом теплового излучения при температуре нагрева объекта до $\sim 100^\circ\text{C}$. Это порождает дискуссии о природе наблюдаемого при спиновой инжекции током излучения. Проведенные исследования [5] показали одновременное присутствие в спектре теплового и динамического излучений. При этом их поведение различно при изменении величины протекающего через переход тока (рис. 3б).

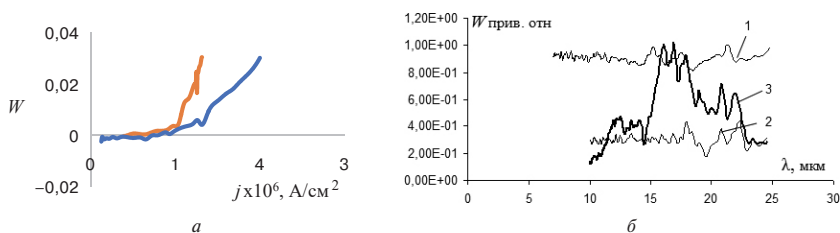


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от плотности тока через переход (а); спектры сигнала: 1 — глобар (тепловой источник), 2 — спектр сигнала излучателя при токе 30 мА (меньше пускового тока), 3 — спектр сигнала излучателя при токе 82 мА (выше пускового тока) (б)

Заклучение

Предложенный спин-инжекционный принцип формирования ТГц-излучения может быть использован для создания малогабаритных маломощных источников излучения этого диапазона частот.

Литература

1. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Панас А. И., Эпштейн Э. М., Чигарев С. Г. Патент РФ № 2464683. 2012.
2. Gulyaev Yu. V., Chigarev S. G., Panas A. I., Vilkov E. A., Maksimov N. A., Zagorskii D. A. and Shatalov A. S. // Technical Physics Letters, 2019. Vol. 45. № 3. P. 270–272.
3. Шаталов А. С., Загорский Д. Л., Чигарев С. Г., Дюжиков И. Н. Патент РФ № 2715892. 2020.
4. Гуляев Ю. В., Вилков Е. А., Зильберман П. Е., Михайлов Г. М., Черных А. В., Чигарев С. Г. // Письма в ЖЭТФ, 2014. — Т. 99. — № 9–10. — С. 591–594.
5. Zagorskiy D., Doludenko I., Chigarev S., Vilkov E., Kanevskii V. and Panas A. // IEEE Transactions on Magnetics, 2022. Vol. 58. № 2.



УДК 621.3.019.3

Проблемы прогнозирования времени хранения информации микросхем памяти на основе EEPROM-ячеек

Селецкий А. В., к. т. н., Соловьев А. В. к. т. н., Кравцов А. С.
АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
aseletskiy@niime.ru

Проблемой прогнозирования надежности микросхем EEPROM является отсутствие возможности фиксации скорости стекания заряда с плавающего затвора. При этом исследование отдельных ячеек в составе пластины показало немонотонность и отсутствие тренда деградации при температурах ниже 150 °С.

Ключевые слова: надежность; EEPROM; сохранность логического состояния.

Наличие ячеек EEPROM в составе микросхем определяет необходимость контролировать надежность изделия по критерию сохранности информации. При этом известно, что ячейки памяти с плавающим затвором имеют тенденцию терять заряд при воздействии таких дестабилизирующих факторов, как время эксплуатации, количество циклов перезаписи, температура, радиация и т. д. [1–2].

Использование классических методов прогнозирования надежности на основе отслеживания тренда деградации электрофизических параметров в случае микросхем энергонезависимой памяти затруднено, поскольку имеется возможность зафиксировать только факт отказа (изменения логического состояния), но не скорость его наступления. По этой причине в качестве исходных данных предлагается использовать тренд деградации отдельных ячеек памяти (и массивов), входящих в состав параметрического монитора технологии. Полученные данные предполагается экстраполировать на микросхемы, т. е. в качестве критерия отказа использовать конкретные режимы записи, считывания и стирания и соответствующие им токи или пороговые напряжения ячеек памяти.

Проведено исследование деградационных процессов ячеек EEPROM, выполненных по КМОП-технологии с проектными нормами 0,18 мкм. Пять пластин с предварительно записанной информацией выдерживались при повышенной температуре от 150 до 300 °С без электрической нагрузки в течение 240 часов с контролем пороговых напряжений каждые 48 часов. Анализ результатов осуществлялся в следующем порядке:

- 1) на каждой точке контроля вычислялась средняя величина пороговых напряжений;
- 2) полученные данные аппроксимировались линейным и логнормальным трендом;
- 3) определялись доверительные границы скорости деградации;
- 4) определялось время достижения 10 % деградации порогового напряжения;
- 5) определялись энергия активации и пересчет на температуру эксплуатации.

Стоит отметить, что на первом этапе, при достаточной величине выборки или наличии достоверной информации о дисперсии величин параметров, целесообразно проводить исключение аномальных выбросов, например, с помощью использования критерия Граббса [3]. На втором этапе необходимо проверить адекватность

полученного тренда с помощью коэффициента детерминации и наличие деградации с помощью критерия Фишера [4]. На третьем этапе доверительные границы скорости деградации выбираются исходя из теории нормального распределения параметров [5].

В результате проведенного исследования было установлено следующее.

1. В начальный промежуток времени (первые 48 часов) происходит существенная деградация, не укладывающаяся в линейный тренд, но вписывающаяся в логнормальную тенденцию. Однако отсутствие промежуточных точек контроля приводит к существенной ошибке прогнозирования.

2. При температурах ниже 200 °С для состояния с низким пороговым напряжением и при температурах ниже 150 °С для состояния с высоким пороговым напряжением фактически не наблюдается деградации, что свидетельствует о высокой надежности технологии к деградационным отказам.

3. Целесообразно проведение более длительных испытаний с периодичностью контроля 2–4 точки на декаду, что практически невозможно выполнить в рамках испытаний на пластине, поскольку многократное контактирование зондами будет приводить к разрушению контактных площадок и искажению результатов испытаний.

Литература

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Красников Г.Я., Зайцев Н.А., Красников А.Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
3. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.
4. Snedecor G.W. and Cochran W.G. Statistical Methods, Eighth Edition, Iowa State University Press, 1989.
5. ГОСТ Р 50779.21. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.



УДК 621.31

Экстраполяционный метод оценки времени хранения логического состояния ячейки энергонезависимой памяти SONOS

Червонный Д. В., Арилин Р. А., Болычев Д. И.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

dchervonnyu@niime.ru

Представлены зависимости логических состояний структуры SONOS от времени при различных температурах. Проведен анализ возможных путей оценки надежности структуры. Разработан экстраполяционный метод оценки времени хранения логического состояния ячейки энергонезависимой памяти SONOS, базирующейся на технологии 180 нм.

Ключевые слова: температурный отжиг; SONOS; встроенная память; логические состояния; уравнение Аррениуса.

Одним из перспективных направлений развития энергонезависимой памяти является технология SONOS. Оценка времени хранения заряда в структуре является актуальной проблемой. Способность сохранять заряд в течение длительного времени при различных внешних воздействиях характеризует надежность ячейки. Поскольку технология SONOS подразумевает использование диэлектрика в качестве запоминающего слоя, методика оценки времени хранения отличается от «плавающего затвора» технологии EEPROM.

Ранее в АО «НИИМЭ» была разработана структура памяти, содержащая нитрид кремния в качестве запоминающего слоя, на которой проводились исследования хранения заряда в целях определения методики оценки долговременного хранения заряда (критерий — не менее 10 лет при температуре до +85 °С).

В данной работе представлены результаты оценки времени хранения логических состояний ячейки памяти SONOS на базе отечественного техпроцесса КМОП 180 нм. Описаны проблемы использования классического метода анализа надежности структуры с помощью расчета уравнения Аррениуса. Представлены результаты длительного температурного отжига структур.

В результате исследования был разработан экстраполяционный метод оценки времени хранения логического состояния ячейки энергонезависимой памяти SONOS по критерию различимости логических состояний «0» и «1» в течение 10 лет при температуре +85 °С.

Работа выполнена при поддержке ФПИ (проект № 7-208-2020-2024)

«Радиационно стойкая энергонезависимая память»

Литература

1. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Кобыляцкий А. В., Петричкович Я. Я. Радиационно стойкие элементы памяти для нанометровых КМОП СФ-блоков и СБИС // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — № 1. — С. 10–16.

2. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4-64 МБИТ для космических применений // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 4–10.
3. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Большев Д. И. // Наноиндустрия, 2021. — Т. 13. — № S7 (107). — С. 180–181.
4. Кобыляцкий А. В. Библиотеки элементов для проектирования радиационно стойких СБИС типа «Система на кристалле» // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2019. — № 1. — С. 32–27.



УДК 621.37

Состояние и перспективы новых разработок прецизионных радиационно стойких микросхем операционных усилителей с малыми входными токами производства АО «Ангстрем»

Трудновская Е. А., Воробьев А. Д., Гамарц И. А., Лапшина Е. В.

АО «Ангстрем»

122460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3

diamond@angstrom.ru

Рассмотрены особенности конструкции и технологии изготовления прецизионных операционных усилителей (ОУ) с малыми входными токами. Показана возможность повышения радиационной стойкости ОУ переходом от технологии с нестойкими латеральными PNP-транзисторами к более сложному комплементарному биполярному процессу с вертикальными NPN- и PNP-транзисторами (серия 1494.) Дополнена технология радиационно стойких микросхем ОУ опцией формирования JFET-транзисторов и тонкопленочных резисторов (ТПР) для разработок микросхем ОУ серии 1496 с малыми входными токами не более 45 пА, работающих в расширенном диапазоне питающих напряжений.

Ключевые слова: операционные усилители (ОУ); радиационная стойкость; комплементарный биполярный процесс с вертикальными NPN- и PNP-транзисторами; JFET-транзисторы; маломощные ОУ; граничная частота усиления транзисторов.

Для производства ряда интегральных микросхем операционных усилителей (ОУ) 140 серии АО «Ангстрем» был разработан базовый технологический маршрут, максимально адаптированный под КМОП-технологические операции ионного легирования бора и фосфора, РИТ (реактивное ионное травление) контактных окон, металла и защиты. ОУ 140 серии выпускаются в металлокерамических, металло-стеклянных и металлополимерных корпусах.

Для получения малых входных токов ОУ была использована схема компенсации, которая выполнена на токовых зеркалах и основана на идентичности (согласованности) параметров одноименных NPN- и PNP-транзисторов. При современном технологическом уровне это позволяет уменьшить входные токи ОУ приблизительно в 50 раз, однако приводит к тому, что PNP-транзисторы, задействованные в схеме компенсации, работают на очень малых токах коллектора порядка 0,5 мкА.

Для нестойких ранее разработанных схем ОУ серии 140 латеральные PNP-транзисторы идеально подходят для этой цели и обеспечивают хорошую работу схемы компенсации. Однако после воздействия γ -излучения ситуация катастрофически меняется. Коэффициент усиления латеральных PNP-транзисторов на токе коллектора ~ 1 мкА может уменьшиться в десятки раз. Деградация коэффициентов усиления латеральных PNP и вертикальных NPN является основным фактором катастрофического увеличения входных токов ранее выпускаемых ОУ.

Для обеспечения радиационной стойкости ОУ с малыми входными токами был разработан 36-вольтовый комплементарный биполярный процесс

с вертикальными NPN- и PNP-транзисторами с малой глубиной базы (с высокочастотной структурой).

По сравнению с «классическим» маршрутом пришлось существенно усложнить технологический процесс, который включает 20 фотокопий (в т. ч. две знаковые). Изготовление проводится на эпитаксиальных структурах со скрытыми N+ и P+-слоями на P-подложке. Изоляция выполняется PN-переходом, проектная норма — 3 мкм, один слой поликремния, один слой металла.

Данная технология была использована при разработке малошумящих радиационно стойких прецизионных ОУ серии 1494 с напряжением питания 36 В.

Для разработки малошумящих радиационно стойких ОУ серии 1496 с малым входным током не более 45 пА, работающих в расширенном диапазоне питающих напряжений, технология радиационно стойких микросхем ОУ была дополнена опцией формирования JFET-транзисторов и тонкопленочных резисторов (ТПР) с малым ТКС = +400 ppm/°C с двумя слоями металлизации.

Для обеспечения требуемых частотных характеристик ряда ОУ проектная норма уменьшена с 3,0 до 1,2 мкм, уменьшены размеры компонентов и толщина эпитаксии. При этом напряжение питания уменьшено с 36 до 12 В. Общее количество фотокопий серии 1496 увеличилось до 24.

АО «Ангстрем» выпускает микросхемы ОУ серии 1496 в металлокерамических корпусах и ведет работы по освоению данных ОУ в металлополимерных корпусах.

Реализация указанных проектов позволяет обеспечить более высокую точность, производительность и надежность работы электронных систем, функционирующих в условиях воздействия радиации.

Литература

1. Holmes-Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation effects. Oxford University Press, 1993.

УДК 621.3.049.771.14

Разработка пластин с кристаллами заказанных элементов**Лукошко Г. К., к. т. н., Депутатов Д. А., Жаворонкин Ю. Г., Моисеенко Н. Ф.,
к. ф.-м. н., Коньков Р. С.***АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1**glukoshko@niime.ru*

В работе рассмотрены процесс разработки пластин с кристаллами заказанных элементов по отечественным технологиям и взаимодействие разработчика пластин, изготовителя пластин и разработчика микросхем при выполнении заказов на разработку и изготовление пластин.

Ключевые слова: технология; микроэлектроника; пластины.

Одним из направлений работ АО «НИИМЭ» является выполнение заказов российских центров проектирования микросхем на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов интегральных микросхем в режиме foundry [1]. После заключения соглашения о конфиденциальности АО «НИИМЭ» предоставляет разработчикам микросхем доступ к комплектам средств проектирования (PDK), библиотекам стандартных ячеек (Stdcells), библиотекам ячеек ввода-вывода (IO cells), а при необходимости разрабатывает с использованием компиляторов блоки оперативной и постоянной памяти (SRAM, ROM) требуемой конфигурации. В рамках лицензионных договоров АО «НИИМЭ» предоставляет лицензии на использование сложнфункциональных блоков (IP-блоков) различного назначения. Заказ на разработку и изготовление пластин осуществляется в форме договора с АО «НИИМЭ» на выполнение составной части опытно-конструкторской работы или договора на выполнение работ. После заключения договора разработчики микросхем передают разработанную топологию вместе с сопроводительной документацией в АО «НИИМЭ».

При выполнении заказов на разработку и изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов руководствуются условиями договора и действующей нормативной документацией, в которой регламентируется порядок взаимодействия разработчика микросхем и изготовителя пластин и изложены общие технические условия на пластины. В зависимости от потребностей заказчиков разрабатываются и изготавливаются макетные или опытные образцы пластин. АО «НИИМЭ» выполняет функции разработчика пластин и осуществляет прием топологии от заказчика, входной контроль топологии на соответствие конструкторско-технологическим ограничениям (DRM), разработку фотошаблонов, разработку конструкторской документации на пластины, включая технические условия на пластины, разработку программы предварительных испытаний опытных образцов пластин, техническое сопровождение изготовления пластин, отгрузку пластин заказчику. Изготовитель пластин по заказу АО «НИИМЭ» производит разработку технологической документации на пластины, закупку фотошаблонов, изготовление макетных и опытных пластин и проведение их испытаний, а по заказам потребителей осуществляет серийные поставки пластин.

Литература

1. Шелепин Н. А., Игнатов П. В., Лукошко Г. К., Шипицин Д. С. Возможности и перспективы контрактной разработки и производства кремниевой микроэлектроники на российской полупроводниковой фабрике // 7-я научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. Республика Крым, г. Алушта, 03–09 октября 2021 г. — С. 354–355.

УДК 621.382.3:537.2

Исследование деградации МОП-транзисторов под воздействием горячих носителей при использовании квазистатической методики испытаний

Елисеева Д. А.^{1,2}, Максимов Д. А.¹¹ ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а
eliseeva@nm-tech.org

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана и применена квазистатическая методика испытаний LDD МОП-транзисторов на стойкость к воздействию горячих носителей. Метод накачки заряда, интегрированный в алгоритм тестирования, позволил отследить динамику генерации поверхностных состояний и локализовать их положение в приборе.

Ключевые слова: МОП-транзистор; горячие носители; метод накачки заряда; поверхностные состояния.

Введение

Миниатюризация размеров и увеличение электрических полей в канале МОП-транзисторов требуют повышения внимания к их стойкости к деградации под воздействием горячих носителей. В зависимости от конструктивных особенностей прибора отслеживание данного механизма износа может быть затруднено. Во-первых, изменение параметров МОП-транзисторов с областями слаболегированного стока (LDD) под воздействием горячих носителей является двухстадийным [1]. Во-вторых, структура двойного спейсера может образовывать паразитную энергонезависимую ячейку памяти, что маскирует исследуемый механизм [2]. Кроме того, стандартные ускоренные испытания не учитывают смену рабочих режимов прибора и соответствующие процессы дефектообразования [3]. Разработанная квазистатическая методика представляет комплексный инструмент для исследования эффекта горячих носителей в МОП-транзисторах.

Результаты испытаний *n*-канальных LDD МОП-транзисторов на стойкость к горячим носителям с применением квазистатической методики

Квазистатическая методика испытаний подразумевает тестирование МОП-транзистора последовательно в нескольких режимах, имитируя рабочий цикл прибора в интегральной схеме. Для анализа деградации *n*-канальных LDD МОП-транзисторов в данной работе выбраны следующие последовательности стрессового воздействия:

- режим 1: поддержание максимума ударной ионизации носителей в канале при напряжении на затворе, для которого ток подложки максимален $V_{gs} = V_{gs}(I_{sub}^{max})$, и напряжении на стоке, равном напряжению питания $V_{ds} = V_{dd}$,
- режим 2: работа в области насыщения при $V_{gs} = V_{ds} = V_{dd}$, сменяемая режимом 1,
- режим 3: работа в подпороговой области при $V_{gs} = V_{dd} / 5$ и $V_{ds} = V_{dd}$, сменяемая режимом 1.

На протяжении испытаний отслеживалось относительное отклонение плотности поверхностных состояний (ПС) $\Delta N_{ss}/N_{ss}$ с помощью интегрированного в алгоритм тестирования метода накачки заряда. Результаты испытаний согласно описанной методике представлены на рис. 1.

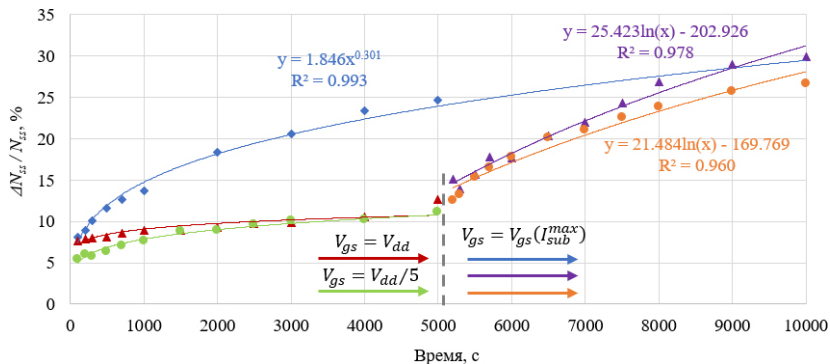


Рис. 1. Зависимость относительного отклонения плотности ПС для n -канальных LDD МОП-транзисторов от длительности испытаний, проведенных в режимах 1–3 с использованием квазистатической методики

Установлено, что наличие стрессового воздействия предшествующего случаю максимума ударной ионизации (режимы 2 и 3) влияет на динамику генерации ПС. Наблюдаются увеличение скорости изменения $\Delta N_{ss}/N_{ss}$ со временем испытаний и несоответствие данной зависимости классической степенной модели. Низкие значения коэффициентов детерминации свидетельствуют о многостадийности процесса генерации ПС. Путем отслеживания тока накачки на каждом временном этапе испытаний МОП-транзистора возможно качественно оценить вклад областей LDD и канала в общее значение плотности ПС.

Заключение

Квазистатическая методика испытаний МОП-транзисторов на стойкость к горячим носителям демонстрирует наличие зависимости динамики деградации параметров прибора и плотности ПС от предшествующего режима работы. Метод накачки заряда при увеличении базового уровня импульса, интегрированный в алгоритм испытаний, может служить инструментом для качественной оценки локализации ПС в структуре прибора.

Литература

1. Chan V.-H., Chung J.-E. Two-stage hot-carrier degradation and its impact on submicrometer LDD NMOSFET lifetime prediction // IEEE Transactions on Electron Devices, 1995. Vol. 42. № 5. P. 957–962.
2. Pat. 7227234B2 United States. Embedded non-volatile memory cell with charge-trapping sidewall spacers / Roizin Y., Fenigstein A.; assignee Tower Semiconductor Ltd. — № 11/104, 210; field 11.04.2005; pub. date 05.06.2007. 16 p.: ill.

3. Eliseeva D. A. Research of hot carrier degradation of submicron n-channel LDD MOS-FETs under static and quasi-static stress conditions // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2022. P. 950–954.

УДК 621.382

Формирование и исследование тонких пленок диэлектриков для применения в новых типах памяти и транзисторных структурах, сформированных методом атомно-слоевого осаждения и низкотемпературного радикального окисления**Резванов А. А.^{1,2}, к. ф.-м. н., Зюзин С. С.^{1,2}, Горохов С. А.^{1,2}, Ганькина Е. А.^{1,2}, Гвоздев В. А.², Резник А. А.^{1,2}, Черняев М. В.¹**¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
arezvanov@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе исследованы процессы атомно-слоевого осаждения (АСО) тонких пленок диэлектриков и низкотемпературного ISSG-окисления кремния. Приведено экспериментальное и модельное представление.

Ключевые слова: оксид гафния; резистивное переключение; сегнетоэлектрический эффект; ab-initio-моделирование; радикальное окисление.

Введение

АСО является ключевым методом нанесения тонких пленок различных материалов благодаря возможности управления структурой пленки при нанометровых толщинах [1], что важно при изготовлении МОП-транзисторов, энергонезависимой памяти ReRAM, FeRAM [2, 3] на основе HfO_2 . С другой стороны, благодаря уникальным свойствам границы раздела Si-SiO₂ ответом на новые технологические требования стало создание процесса ISSG-окисления кремния при пониженном давлении. Экспериментальному и модельному исследованию разрабатываемых процессов осаждения диэлектрических пленок и посвящена данная работа.

Результаты***FeRAM/ReRAM***

Был реализован процесс АСО оксида гафния, оксида циркония и их смеси на отечественной установке «Изофаз ТМ-200-01». Анализ равномерности выращиваемой пленки показал, что получаемые слои растут равномерно (200 нм), среднеквадратичное отклонение (СКО) составляет менее 1%. В качестве использования разработанного процесса для памяти FeRAM был получен ресурс переключения не менее 10^6 циклов с поляризацией порядка 25 мкКл/см². Изготовленные образцы элементов хранения ReRAM-памяти на основе оксидов тантала и гафния продемонстрировали наличие резистивного переключения и показали хорошую стабильность (10^6 циклов) и повторяемость.

Модельное представление

Была разработана модель осаждения слоев оксида гафния и циркония на кремниевой подложке с учетом поверхностных состояний и возможных событий на поверхности, например адсорбции и десорбции прекурсора и кислорода, миграции по поверхности, окисления, уплотнения, стерических эффектов и др. Полученные



результаты модели коррелируют с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность модели.

Изучение физических свойств соединения оксида гафния, легированного цирконием, проводилось в программном пакете Quantum ESPRESSO. Полученные результаты квантово-химического моделирования показали, что диоксид гафния-циркония обладает приемлемым уровнем остаточной поляризации — $49,7 \text{ мКл/см}^2$, диэлектрической проницаемости — 90 и шириной запрещенной зоны — 5,74 эВ.

Для учета в ReRAM-памяти стохастического характера таких процессов, как генерация, рекомбинация и диффузия кислородных вакансий, использовался кинетический метод Монте-Карло, в котором проводился одновременный учет диффузии, дрейфа и термодиффузии кислородных вакансий. Результаты моделирования коррелируют с экспериментальными данными (сопоставление ВАХ), что позволяет говорить об адекватности работы предложенной модели.

ISSG-окисление

Выбор технологических параметров процесса радикального окисления для достижения максимального количества радикалов кислорода определялся по результату предварительного моделирования состава газовой среды в реакторе пониженного давления. Показано, что скорость низкотемпературного радикального ISSG-окисления характеризуется экспоненциальным законом роста, что позволяет сделать вывод о едином механизме ISSG радикального окисления в диапазоне температуры 500–1050 °С. Самоограничение толщины оксида при температуре ниже 700 °С имеет большое практическое значение, так как позволяет управлять процессом формирования тонкого диэлектрика температурой, а не временем процесса.

Заключение

Технологии, методики исследования и модельное представление процессов формирования и функционирования тонких слоев окислов для различного применения в сфере микроэлектроники необходимо постоянно модернизировать в целях получения итоговых элементов с уникальными свойствами и характеристиками.

Литература

1. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз ТМ 200-01» // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № 8-2. — С. 548–552.
2. Красников Г. Я. и др. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти типа PCM // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 38–44.
3. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling // IEEE Transactions on Electron Devices, 2012. Vol. 59. № 9. P. 2468–2475.

УДК 53.083.98

Особенности организации процесса контроля толщин тонких металлических пленок в производственном цикле

Волоховский А. Д.¹, Нелюбин И. В.^{1,2}, Горностай-Польский В. С.^{1,2}

¹ ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а
volohovskiy@nm-tech.org

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработаны физико-математические модели для контроля толщин тонких металлических пленок методом фотоакустики. Рассмотрены основные типы пленок и тонкопленочных структур, применяемых в цикле производства интегральных микросхем. Проведена апробация полученных результатов.

Ключевые слова: фотоакустика; контроль процессов; тонкие пленки; тонкие пленки металлов; измерение толщины тонких пленок.

«Стандартные» для кристалльного производства интерферометрические методы контроля толщин тонких пленок, такие как спектрофотометрия и эллипсометрия, имеют фундаментальное ограничение: исследуемые пленки должны быть прозрачными. В связи с этим для контроля толщин металлических пленок требуется внедрение альтернативных методов контроля, к которым относится рассматриваемый в данной работе акустооптический метод.

Численное описание механизма генерации акустических волн под воздействием коротких лазерных импульсов и расчет пространственной формы сгенерированного импульса впервые проведены в работах [1, 2]. Принципиальная оптическая схема приведена на рис. 1.

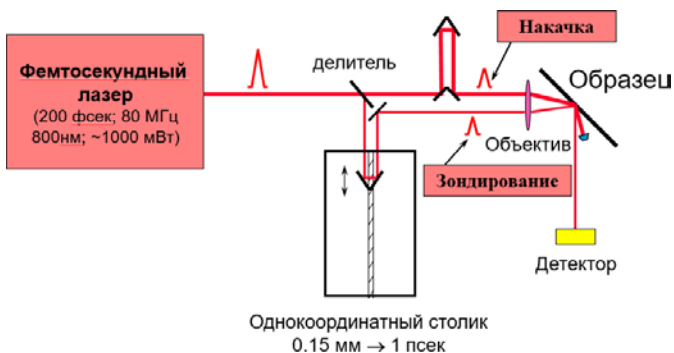


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема фотоакустического эксперимента

Короткий лазерный импульс с энергией Q , падая и поглощаясь свободной поверхностью пленки толщиной d , приводит к локальному повышению температуры образца.

Локальное повышение температуры приводит к термическому расширению, которое начинает распространяться вглубь образца в виде волны деформации. Волна деформации распространяется до подлежащей границы раздела, частично отражается от нее и начинает двигаться в обратном направлении.

Для детектирования используется зондирующий импульс, приходящий на образец с некоторой временной задержкой t . С его помощью измеряется изменение отражательной способности образца, ΔR , происходящее вследствие интерференции света на подповерхностной волне деформации.

Так как момент выхода пленки на поверхность неизвестен, проводится серия измерений с изменением времени задержки в диапазоне ожидаемых значений. Вид зависимости изменения коэффициента отражения от времени задержки импульса зондирования для структуры TiN/SiO₂ приведен на рис. 2.

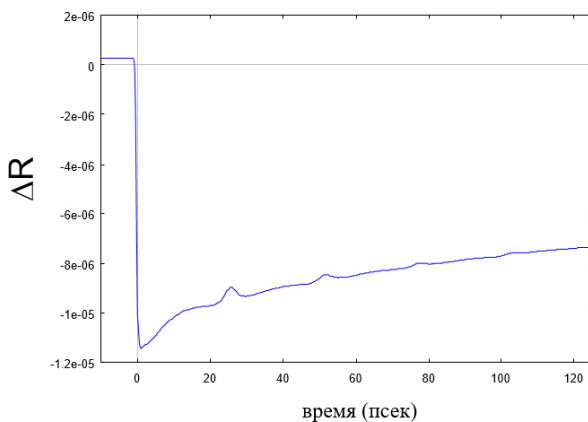


Рис. 2. График изменения отражательной способности образца в зависимости от времени задержки между импульсами накачки и зондирования

Изменения отражательной способности вследствие интерференции на подповерхностной волне деформации видны на рис. 3 как небольшие локальные максимумы с одинаковым периодом, затухающие по амплитуде с ростом времени задержки.

Для поиска результирующего значения толщины исследуемой пленки используется метод наименьших квадратов [3].

В работе проведен ряд экспериментов с тонкопленочными структурами, применяемыми в технологическом цикле производства изделий КМОП, среди которых TiN/SiO₂, Al/SiO₂, TiN/Al/SiO₂ и другие. Построены математические модели данных структур и проведен расчет значения толщины.

Акустооптический метод контроля имеет преимущества, среди которых можно выделить неразрушающий характер, возможность контроля непосредственно на рабочих пластинах с топологическим рисунком, высокую прецизионность и производительность.

Литература

1. Thomsen C., Strait J., Vardeny Z., Maris H. J., Tauc J. and Hauser J. J. Coherent Phonon Generation and Detection by Picosecond Light Pulses // Physical Review Letters, 1984. 53 (10). P. 989–992.
2. Thomsen C., Grahn H. T., Maris H. J. and Tauc J. Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses // Physical Review B, 1986. 34 (6). P. 4129–4138.
3. Draper N. R. and Smith H. Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York, QA278.2.D7, 1981. P. 218–221.

УДК 519.253

Пространственная корреляция как фактор, связывающий наблюдаемую и полную дисперсию параметров полупроводниковых пластин

Майоров А. С.

ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а

amayorov@nm-tech.org

Рассмотрен метод автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности в применении к параметрам, измеряемым на полупроводниковых пластинах. Приведено выражение для спектральной плотности мощности и для оценки доли наблюдаемого при выборочных измерениях значения дисперсии.

Ключевые слова: автокорреляционная функция; спектральная плотность мощности; пространственная корреляция; межоперационный контроль.

Введение

Контроль параметров полупроводниковых пластин является неотъемлемой частью технологического процесса. Параметры контролируются в нескольких точках пластины, чтобы получить представление о распределении параметра. Традиционно результаты измерения параметра в нескольких точках пластины интерпретируются как случайная величина с нормальным распределением. Этот подход не позволяет получить выражение для размаха функции значения параметра на любом ограниченном множестве.

Для корректного описания функции значения параметра необходимо учитывать наличие корреляции между значениями этой функции в разных точках пластины.

Автокорреляционная функция

Рассмотрим значения, получаемые при измерении пластины, не как выборку значений случайной функции, а как значения некоторой неизвестной, но полностью детерминированной стационарной функции $f(r)$, определенной на области S .

Меру связи между двумя точками функции, находящимися на расстоянии ρ , можно описать с помощью автокорреляционной функции [1]:

$$k_f(\rho) = \frac{1}{S} \int_S f(r)f(r+\rho)dr.$$

Автокорреляционную функцию можно найти как преобразование Фурье спектральной плотности мощности [2]:

$$k_f(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} S_f(\omega)e^{i2\pi\omega\rho}d\omega,$$

где $S_f(\omega) = |\hat{f}(\omega)|^2$ — спектральная плотность мощности функции $f(r)$.

Преобразование Фурье функции $f(r)$ и ее спектральная плотность мощности

Мы можем рассмотреть функцию $f(r)$ как результат диффузионного процесса, т. е. результат свертки с ядром оператора диффузии.

Согласно теореме о свертке [3] фурье-образ такой функции будет равен

$$\hat{f}(\omega) = \hat{D}(\omega)\hat{g}(\omega) = \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi}}e^{-(\lambda\omega)^2}\hat{g}(\omega).$$

В качестве оценки худшего случая предположим, что функция $g(r)$ не имеет пространственной корреляции. Для этого случая получена следующая оценка модуля фурье-образа:

$$|\hat{f}(\omega)| = |\hat{D}(\omega)| \cdot |\hat{g}(\omega)| = \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi}}e^{-(\lambda\omega)^2}. \tag{1}$$

Влияние выборочных измерений на наблюдаемую дисперсию

При измерении мы имеем дело с новой функцией $h_L(r)$, связанной с $f(r)$, поскольку мы не можем при выборочных измерениях получить значение $f(r)$ во всех точках области S и вынуждены ограничиться конечным количеством точек выборки.

Для фурье-образа функции $h_L(r)$ получено выражение

$$\hat{h}_L(\omega) = \hat{f}(\omega)\text{sinc}(L\omega). \tag{2}$$

На основе (1) и (2) получено выражение для отношения наблюдаемой дисперсии параметра величины по пластине к полной дисперсии:

$$\eta = \frac{\int \left| \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi}}e^{-(\lambda\omega)^2}\text{sinc}(L\omega) \right|^2 d\omega}{\int \left| \frac{2\lambda}{\sqrt{\pi}}e^{-(\lambda\omega)^2} \right|^2 d\omega}. \tag{3}$$

Результат численного интегрирования выражения (4) с помощью пакета R [4] приведен на рис. 1.

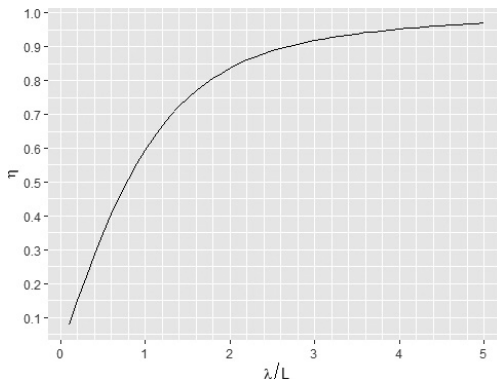


Рис. 1. Зависимость доли наблюдаемой дисперсии от соотношения между диффузионной длиной и расстоянием между точками выборки



Заключение

Формализм автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности функции значения параметра позволяет описать статистическую связь между значениями параметра в рамках одного объекта, например пластины с кристаллами интегральной схемы. Полученные модели и соотношения могут быть использованы при разработке браковочных границ технологических процессов изготовления полупроводниковых пластин, а также при проведении статистического SPICE-моделирования с учетом разброса параметров методом Монте-Карло.

Литература

1. Яглом А. М. Корреляционная теория стационарных случайных функций. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1981.
2. Wiener Norbert. Generalized Harmonic Analysis // Acta Mathematica. 55, 1930. P. 117–258. DOI: 10.1007/bf02546511. <https://doi.org/10.1007%2Fbf02546511>.
3. Зорич В. А. Математический анализ. Часть II. Изд. 9-е, испр. — М.: МЦНМО, 2019.
4. R: A Language and Environment for Statistical Computing / R Core Team. — <https://www.R-project.org>.

УДК 53.082.5

Разработка методики in-line-контроля геометрических параметров фоторезистивных масок с помощью оптической скаттерометрииНелюбин И. В.^{1,2}, Волоховский А. Д.¹¹ ООО «НМ-Тех»*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6, этаж 1, помещение XII, офис 4,4а
info@nm-tech.org*² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Рассмотрены особенности применения оптической скаттерометрии в качестве инструмента контроля процессов фотолитографии. Показана принципиальная возможность контроля вертикальных геометрических параметров, обеспечивающая преимущество скаттерометрии перед классическими методами.

Ключевые слова: скаттерометрия; фоторезистивная маска; критические размеры; электронная микроскопия.

Введение

В современной микроэлектронной технологии контроль процессов формирования фоторезистивных элементов должен подразумевать не только измерение критических размеров, но и характеризацию их трехмерного профиля, включая измерение вертикальных размеров, углов наклона боковых стенок и др. [1]. Традиционно применяемый метод контроля, растровая электронная микроскопия, зачастую не удовлетворяет требованиям к измерению профилей трехмерных структур. Кроме того, критические размеры фоторезистивных масок для AgF-литографии зависят от времени экспозиции электронным пучком (эффект сгорания AgF-фоторезиста [2]), что напрямую влияет на получаемые результаты измерений. В данной работе в качестве инструмента контроля геометрических параметров фоторезистивной маски рассматривается метод оптической скаттерометрии. Показана возможность применения данного метода в непрерывном производственном цикле.

Метод оптической скаттерометрии

Процесс проведения скаттерометрических измерений состоит из двух этапов: определение оптических свойств материалов структур и далее определение (уточнение) геометрических параметров исследуемых структур. Для определения оптического отклика зачастую используется стандартная интерференционная техника (в данном случае спектральная эллипсометрия). Расчет же геометрических параметров предполагает изначальное знание дисперсионных моделей материалов всех слоев, входящих в структуру, что представляет основную сложность при разработке методики измерений.

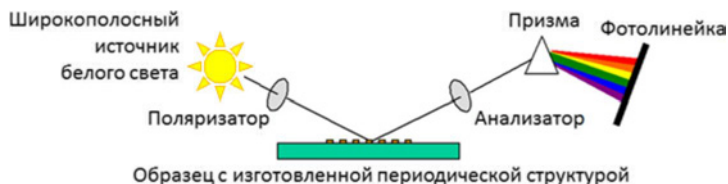


Рис. 1. Структурная схема скаттерометрических измерений [3]

Экспериментальная часть

В настоящей работе исследуются периодические решетки фоторезистивных масок (с различным периодом) и их геометрические параметры (размер маски по низу, размер по верху, угол наклона стенки фоторезиста, а также его толщина). Измерительные структуры изготавливаются в едином технологическом цикле с продуктовыми изделиями (на тех же пластинах, в дорожке реза между кристаллами), что исключает дополнительные затраты для данных измерений.

Представлен сравнительный анализ полученных результатов с результатами независимых измерений (растровой электронной микроскопии). Показано, что для некоторых геометрических параметров характерна разница в результатах измерений для двух методик. Стоит отметить низкие значения среднеквадратичного отклонения (в частности, для угла наклона боковых стенок), полученные методом скаттерометрии.

Заключение

Рассмотрены особенности контроля геометрических параметров фоторезистивных масок с помощью метода оптической скаттерометрии. Преимущества данной методики позволяют осуществить ее внедрение в непрерывный технологический цикл производства. В результате может быть достигнут экономический эффект, обусловленный отсутствием дополнительных затрат на операции контроля (дополнительных пластин для анализа, времени).

Литература

1. Ukrantsev V. A. et al. The role of AFM in semiconductor technology development: the 65 nm technology node and beyond // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX. SPIE, 2005. Vol. 5752. P. 127–139.
2. Breton M. A. et al. Resist shrink characterization methodology for more accurate CD metrology // Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI. SPIE, 2022. P. PC120530C.
3. Allgair J. A. et al. Implementation of spectroscopic critical dimension (SCD) (TM) for gate CD control and stepper characterization // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XV. SPIE, 2001. Vol. 4344. P. 462–471.

УДК 621.382

Корпуса для микросхем автомобильной электроники. Анализ требований

Евстигнеев С. В., Сынгаевский В. А., Мозгов С. А., Кривопапов Д. М.
ООО «НМ-Тех»
*124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4, 4а*
*evstigneev@nm-tech.org, syngaevskiy@nm-tech.org, mozgov@nm-tech.org,
krivopalov@nm-tech.org*

Автоэлектроника является одним из крупнейших сегментов рынка российской ЭКБ и требует наряду с проектированием и производством микросхем освоение технологии крупносерийной сборки кристаллов в металлополимерных корпусах. В статье представлен анализ требований к корпусам ИС автоэлектроники.

Ключевые слова: автоэлектроника; корпусирование; металлополимерный корпус; АЕС-Q100.

Введение

Требуемые в России объемы выпуска для микросхем автоэлектроники составляют от единиц до нескольких десятков миллионов штук на изделие ежегодно. В отличие от потребительских и промышленных ИС микросхемы для автомобилей должны сохранять свою работоспособность в широком диапазоне температур на протяжении 20 лет. Эти базовые условия в основном и формируют конкретный набор требований к корпусам автомобильных ИС.

Анализ требований к автомобильным ИС

Необходимость поставки миллионов микросхем в год налагает серьезные ограничения на цену поставляемого изделия, которая должна уверенно снижаться на всем многолетнем периоде продаж. Поэтому очевидным выбором материала корпуса, который мировая промышленность сделала десятилетия назад, является пластик, и даже в этом случае стоимость корпуса может составлять до 30–40% себестоимости всего изделия. Альтернатива металлополимерным корпусам в этом сегменте ЭКБ просто отсутствует, а корпусировка многомиллионных серий кристаллов «в пластик» является одной из важнейших задач достижения технологического суверенитета в автомобилестроении. Проблема в этом вопросе простирается за рамки собственно технологии корпусировки полупроводниковых кристаллов и затрагивает электронное машиностроение и материаловедение. Например, температура стеклования компаундов для ИС автоэлектроники должна превышать +175 °С с гарантированным качеством в доли ppm (parts per million).

Половину микросхем автоэлектроники составляют аналоговые и смешанные ИС, работающие на повышенных токах и напряжениях. Поэтому корпус таких ИС должен обеспечить эффективный теплоотвод, заземление и низкое сопротивление разварочных проводов. Как следствие, металлополимерные корпуса автоэлектроники такого класса должны иметь дополнительную теплоотводящую контактную площадку — *exposed pad* (рис. 1), медные разварочные провода диаметром до 38 или



даже 50 мкм и 2- или даже 3-уровневую архитектуру выводной рамки для реализации внутреннего кольца земли.

Учитывая вышеперечисленные требования для корпусов «силовых» автомобильных ИС и принимая во внимание высокую степень интеграции функций в современных микросхемах такого класса, наиболее перспективным выступает металлополимерный корпус типа LQFP (low profile quad flat package) [1] с теплоотводящей контактной площадкой и различным числом выводов.

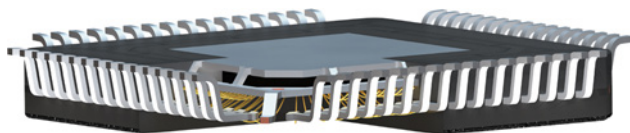


Рис. 1. Металлополимерный корпус типа LQFP с теплоотводящей площадкой (exposed pad) и кольцом земли

На рис. 2 представлена 3-уровневая выводная рамка, разработанная специалистами «НМ-Тех» для микросхемы U-chip контроллера управления двигателем внутреннего сгорания.

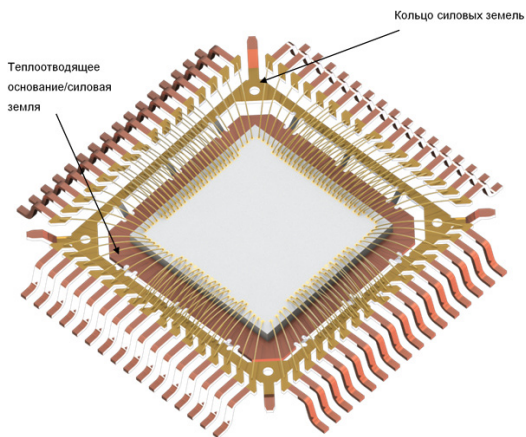


Рис. 2. 3-уровневая выводная рамка на 64 вывода для микросхемы U-chip контроллера управления двигателем внутреннего сгорания

На рис. 3 показана разварка на два уровня выводной рамки.



Рис. 3. Металлополимерный корпус типа LQFP с 2-уровневой разваркой проводов

Необходимо также отметить, что каждая закорпусированная микросхема автоэлектроники должна пройти испытания в соответствии со стандартом АЕС-Q100 [2], включающим и специфичные тесты для корпусов.

Заключение

Металлополимерные корпуса являются безальтернативными в таком массовом сегменте, как автомобильная электроника. Для аналоговых и смешанных схем конструкция выводной рамки должна гарантировать эффективный теплоотвод, заземление и низкое сопротивление разварочных проводов. А разработанный технологический процесс корпусирования «в пластик» полупроводниковых кристаллов должен обеспечивать качество на уровне долей ppm.

Литература

1. MS-026-D Standard — Low/Thin Profile Plastic Quad Flat Package. <https://www.jedec.org>.
2. АЕС-Q100: Failure Mechanism Based Stress Test Qualification For Integrated Circuits. <http://aecouncil.com>.

УДК 621.315.592

Применение имплантационно-диффузионной технологии для создания фотодиодов и детекторов ядерных частиц

Веретенников Д. А., Голубков С. А., Петушков В. Л., Григорьева Т. В.

АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
veretennikov@zntc.ru

В данной работе сравниваются две технологии: ионно-имплантационная (ИИТ) и диффузионно-имплантационная (ИДТ), предназначенные для изготовления детекторов ядерных частиц и фотодиодов на высокоомном кремнии. Показано, что при современной чистоте химических реактивов, газов и кварцевых реакторов диффузионно-имплантационная технология не уступает ионно-имплантационной, а часто бывает более удобной в изготовлении $p-i-n$ -диодов.

Ключевые слова: высокоомный кремний; $p-i-n$ -диоды; диффузия фосфора; имплантация фосфора; геттерирование.

Результаты, полученные по двум сравниваемым технологиям, показали достаточно низкие объемные токи утечки. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность геттерирования быстродиффундирующих примесей в этих технологиях достаточно высокая. Удельное сопротивление подложек остается неизменным, то есть нет загрязнения объема пластины такими примесями, как S (сера), которая может присутствовать в серной кислоте. Заряды в окисле, которые получают при использовании этих двух технологий, не оказывают влияния на сдвиг напряжения обеднения в большую сторону, то есть достаточно малы.

Из-за применения изотипного n^+-n -перехода в ИДТ (рис. 2) поверхностный ток утечки отводится лучше, чем в ИИТ (рис. 1), где на линии реза сформирован текущий p^+-n -переход.

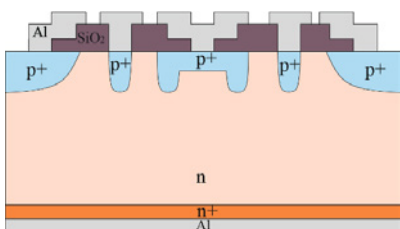


Рис. 1. Структура $p-i-n$ -диода, изготовленного по ИИТ

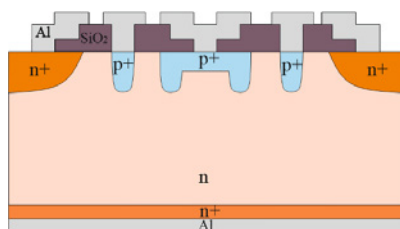


Рис. 2. Структура $p-i-n$ -диода, изготовленного по ИДТ

Генерация носителей заряда с изотипного n^+-n -перехода в ОПЗ $p-i-n$ -диода отсутствует. В данной топологии, которая применялась при изготовлении $p-i-n$ -диодов, линия реза отстоит от последнего кольца на расстояние 450 мкм. Использование изотипного n^+-n -перехода может сократить это расстояние, которое является мертвой поверхностью, так как не участвует в регистрации фотонов света, α -, β - и γ -излучений. Это может быть важно при использовании $p-i-n$ -диодов малой

площади, так как в них будет сильно преобладать периметрическая утечка тока и соотношение полезной площади к общей.

Защита обратной стороны в применяемых технологиях достаточно хорошая, это следует из данных измерений глубины p - n -переходов тестовых пластин. Но в ИДТ это достигается в течение одной операции.

В ИДТ остаточный тонкий окисел после удаления фосфоросиликатного стекла (ФСС) может быть использован в получении разных толщин тонкого SiO_2 .

Таким образом, отсутствие одной фотолитографии под n^+ в ИИТ привело к большему выходу годных p - i - n -диодов площадью 5 см^2 . Поэтому технологию ИИТ необходимо применять на p - i - n -диодах большой площади, где поверхностный ток утечки в меньшей степени преобладает над объемным током утечки.



УДК 621.382

Преимущества автоматического монтажа кристаллов на мягкий припой в формир-газе при сборке силовых элементов

Иванов В. И.

ООО «Остек-ЭК»

121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

ivanov.v@ostec-group.ru

Силовые микроэлектронные устройства работают с высокой плотностью тока. Поэтому все силовые элементы имеют открытый теплоотвод, а кристалл монтируется на припой, образующий интерметаллическое соединение с высокой тепло- и электропроводностью. Процесс монтажа должен проходить в среде, которая может обеспечить отсутствие окислений на спаиваемых поверхностях, что усложняет автоматизацию.

Ключевые слова: силовые микроэлектронные устройства; автоматический монтаж кристаллов; мягкий припой; формир-газ.

Технология монтажа кристаллов на мягкие припои, в первую очередь с высоким содержанием свинца, по-прежнему широко используется в производстве силовых микроэлектронных устройств. Большинство мягких припоев с содержанием свинца, таких как Pb-Sn2-Ag2.5, имеют хорошие углы смачиваемости на медных выводных рамках [1]. Мягкие припои обладают достаточными механическими, термическими и электрическими свойствами. Обеспечиваемое данными припоями тепловыделение составляет порядка 35 Вт/МК, они пластичны и обладают КТР, близким к кремнию и меди, что позволяет сборке выдерживать циклические термические напряжения. Для монтажа силовых кристаллов важна равномерность толщины паяного межсоединения, отсутствие окислений, малые наклон кристалла и количество пустот: эти факторы влияют на надежность и производительность силового устройства [2]. При серийном выпуске с требованиями к высокой производительности монтажа кристаллов на выводные рамки — более одной тысячи кристаллов в час, нужны специализированные установки монтажа с конвейерной системой (рис. 1), несколькими зонами нагрева и подачи формир-газа.

При настройке техпроцесса на установке автоматического монтажа кристаллов на мягкий припой следует учитывать одновременно несколько факторов, особенно работая с несколькими кристаллами или кристаллами больших размеров. Для крупных кристаллов важно качество нанесения припоя: если покрытие будет неполным, это приведет к проблемам с отслаиванием углов. Поэтому после нанесения припоя он выравнивается плоским штампом для равномерного распределения по контактной площадке; важно отметить, что это также минимизирует количество пустот, а затем уже устанавливаются кристаллы (рис. 2).

Мы представим результаты оценки качества, полученные после автоматического монтажа кристаллов в среде формир-газа. Раскроем некоторые конструкционные особенности установок, которые позволяют достигать следующих преимуществ:

- производительность 2–3 тысяч кристаллов в час;
- отсутствие окислений в процессе;
- равномерность толщины припоя в межсоединении (bond-line-thickness, BLT) с индексом воспроизводимости $\leq 2,5$;

- наклон кристаллов с индексом воспроизводимости $\leq 1,7$;
- пустоты $< 5\%$.

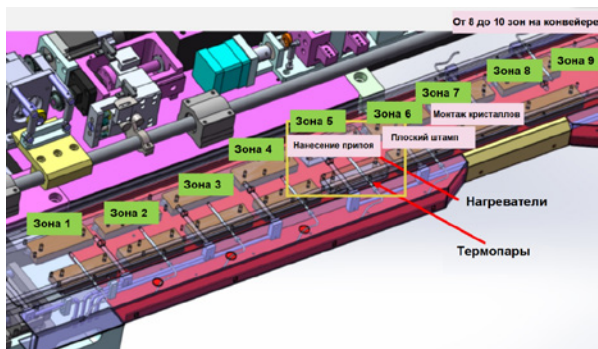


Рис. 1. Конвейерная система подачи установки автоматического монтажа кристаллов в формир-газе



Рис. 2. Силовые кристаллы различных размеров, смонтированные в автоматическом режиме

Чтобы получить надежное соединение при автоматическом монтаже кристаллов с использованием мягкого припоя, следует учитывать базовые взаимосвязанные факторы. Монтаж кристаллов является критически важным процессом сборки, отвечающим за надежность. Для силовых элементов с высокой мощностью серьезность отказа может быть катастрофической, так как они применяются в автомобилестроении, аэрокосмической и военной промышленности.

Литература

1. Suganuma K. Lead Free Soldering in Electronics: Science, Technology, and Environmental Impact. Marcel Dekker, 2004.
2. Manikam V. R. and Cheong K. Y. // IEEE Transac. Comp. Packag. Manuf., 2011. Vol. 1. P. 457–478.



УДК 621.7.01

Оптимизация травления оксидного слоя при формировании TSV-структур

Суханов Д. А.

ООО «Остек-ЭК»

121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

sukhanov.d@ostec-group.ru

Технология сквозного травления кремния (TSV) — ключевая движущая сила для передовых электронных изделий и модулей. Для нее необходим оптимизированный процесс травления оксида на дне TSV при процессе формирования отверстий *via-last* с условием снижения скорости травления оксида верхнего угла TSV.

Ключевые слова: 3D-интеграция; TSV; глубокое травление кремния; *via-last*.

3D-интеграция становится с каждым годом все более значимой технологией и является надежной альтернативой «продолжения жизни» закона Мура. Для нее используются следующие методы формирования отверстий: в начале (*via-first*), в середине (*via-middle*), в конце (*via-last*). Метод *via-last* помогает уменьшить затраты в процессах BEOL и не требует процесса по «вскрытию» TSV.

В подходе *via-last* оксидный изолирующий слой (рис. 1а) наносится в TSV сразу после процесса сухого травления и очистки TSV. Однако данная схема требует более надежного процесса протравливания оксида на дне TSV для установления контакта с нижним слоем межсоединений.

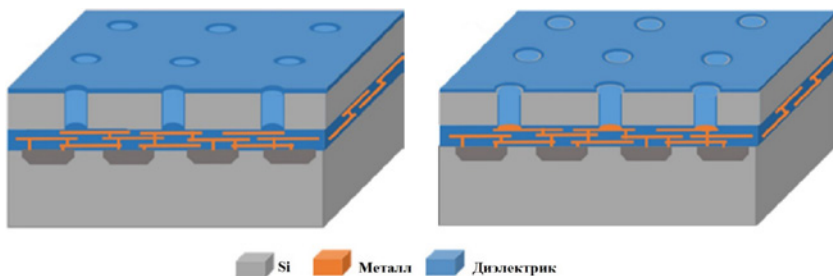
Одной из потенциальных проблем, связанных с процессом протравливания оксида на дне структуры, является защита оксида покрытия верхнего угла TSV для обеспечения электрической надежности. Эта проблема возникает из-за разницы скоростей травления (ER — *etching rate*) на дне TSV и в его верхней части — на углах (рис. 1б).

Слой оксида действует как электрический изолятор для TSV с точки зрения утечки токов, а также как барьер от загрязнений при последующем напылении металла. Во время процесса травления оксида на дне TSV существует проблема потери оксида по верхнему углу TSV (как показано на рис. 1б) из-за высокого потенциала плазменного поля на угле структуры, который подвергается наибольшей ионной бомбардировке.

Есть несколько подходов для уменьшения травления угла TSV: защищать верхний угол TSV с помощью слоя SiN поверх оксида или использовать оптимизированный процесс травления. Интеграционный подход — нанесение толстого твердого слоя оксида ($> 1,5$ мкм) перед травлением TSV. Однако эти подходы, кроме оптимизации, влекут за собой более высокую стоимость процесса в целом.

На рис. 2 показана структура TSV после травления и очистки с гребнями < 40 нм и почти вертикальным профилем. Далее наносится оксидный изолирующий слой толщиной ~ 1 мкм.

На рис. 3 показано TSV с оксидным изолирующим слоем. Начальная толщина оксида (вверху), верхний угол и низ TSV: $\sim 1,31$, $\sim 0,86$ и $\sim 0,85$ мкм соответственно.



а б

Рис. 1. Схема изолятора для интеграции via-last. Стравливание оксида в верхнем углу TSV (б) [1]

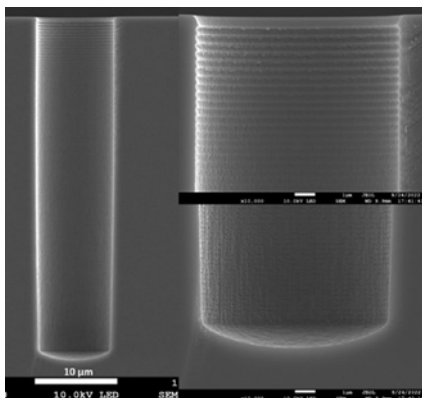


Рис. 2. TSV до нанесения оксидного покрытия [1]

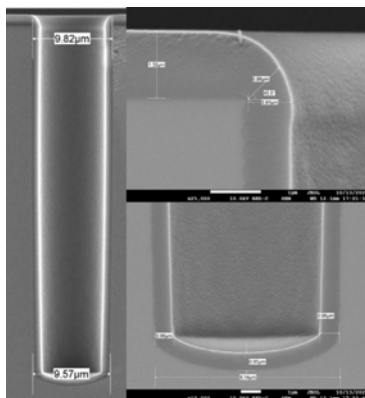


Рис. 3. TSV после осаждения оксидного слоя [1]

Для определения оптимальных условий процесса в качестве параметров использовались Ag , O_2 , C_4F_8 и давление, подбор которых обеспечил необходимую оптимизацию процесса в целом.

При высоком давлении и более высоком потоке C_4F_8 доминирует ER оксида верхнего угла TSV, что приводит к полной его потере во время травления нижнего оксида, как показано на рис. 4.

Оптимизированный поток O_2 в режимах с дефицитом F помог минимизировать ER оксида в верхнем углу TSV. В то же время на дне TSV наблюдается более высокое ER оксида (рис. 5). Также необходимо более низкое давление (<40 мТорр) с потоком $\text{O}_2 < 20$ см³/мин, более высоким расходом Ag (более чем в 10 раз больше потока C_4F_8) и более низким расходом $\text{C}_4\text{F}_8 < 100$ см³/мин.

Оптимизированные условия процесса позволили добиться на 20% более высокого ER оксида на дне TSV, чем на верхнем углу TSV, что реализует высоконадежный процесс травления TSV для схемы интеграции via-last.

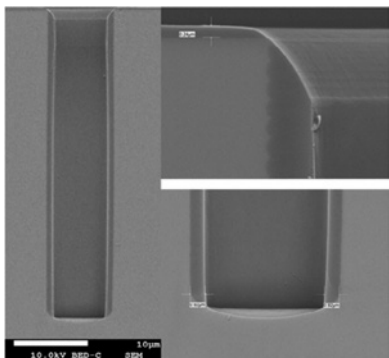


Рис. 4. Неоптимизированный цикл травления оксида в TSV. Источник: [1]

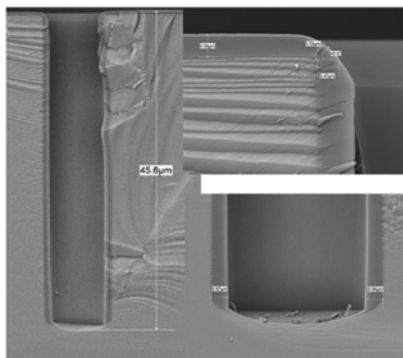


Рис. 5. Оптимизированный цикл травления оксида в TSV

Литература

1. Bhesetti S. S., Rao Chandra, Cheemalamarri Hemanth K., Senthilkumar Darshini. TSV oxide etch-back optimization for the via-last integration scheme // Chip Scale Review. May–June, 2023.

УДК 681.2

Особенности производства и модернизация технологического маршрута и процессов изготовления АМР-преобразователей сенсоров на основе анизотропных магниторезистивных пленок для систем автоматизации, управления и навигации

Романов Д. А., Яковлев О. Ю., Юров А. С., к. т. н., Миронов В. П., к. т. н.
*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
romanovda@zntc.ru*

Анизотропные магниторезистивные преобразователи (АМР-преобразователи) обладают высокой чувствительностью к магнитному полю, обеспечивают высокие уровни первичного сигнала, широкий рабочий температурный диапазон, прочность, надежность и точность работы. Важным обстоятельством является то, что точность измерения магнитного поля с их помощью не зависит от магнитных и механических допусков. Все это позволяет использовать АМР-преобразователи для создания датчиков различного функционального назначения, в частности для автоэлектроники, роботехники, промышленности и систем специального назначения.

В настоящее время АМР-преобразователи широко применяются для различных задач — бесконтактного измерения скорости и направления вращения зубчатых колес и многополюсных магнитных роторов энкодеров, определения угла поворота, величины линейного и углового перемещения и конечного положения, бесконтактного измерения тока (мощности), а также для решения задач определения положения, навигации и наведения по магнитному полю Земли.

Ключевые слова: анизотропный магниторезистивный преобразователь; сенсор; технология производства; магниторезистивная пленка.

В настоящее время традиционный датчик Холла является наиболее широко используемым устройством для регистрации магнитных полей. Однако появление АМР-преобразователей серьезно потеснило позиции датчиков Холла. Это объясняется более высокой, почти на два порядка, чувствительностью АМР-преобразователей к магнитному полю, высоким уровнем первичного сигнала, упрощающим его постобработку, высокой температурной стабильностью, высокой радиационной стойкостью, независимостью точности измерений от механических и магнитных допусков, возможностью использования методов интегральной технологии. Поскольку в технике большое число процедур измерения может быть сведено к измерению магнитного поля или его изменений, то области применений АМР-преобразователей чрезвычайно широки.

Главной проблемой, которая должна быть решена при разработке АМР-преобразователя является обеспечение минимального технологического разброса характеристик основного элемента преобразователя — тонкопленочных магниторезисторов, включенных в мостовую схему и стабильности его параметров. Модернизация технологического маршрута изготовления АМР-сенсора на основе анизотропных магниторезистивных пленок проведена на той же технологической линии без модернизации технологического оборудования и производственных участков,



применения специализированных производственных установок, химии или оснастки, что позволило снизить производственные затраты и себестоимость продукции и повысить процент выхода годных при достижении поставленных задач.



Рис. 1. Структура деления и сферы применения анизотропных магниторезистивных сенсоров

Работы выполнены на оборудовании АО «ЗНЦ»

УДК 621.3.019.3

Определение энергии активации процесса деградации ячеек памяти EEPROM по критерию сохранности состояния

Соловьев А. В. к. т. н.¹, Селецкий А. В. к. т. н.¹, Темирбулатов М. С.¹,
Ашанин М. Е.², Морозов Е. Н.²

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
andsolovlev@niime.ru

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе проведено исследование процесса деградации ячеек памяти EEPROM, выполненных по КМОП-технологии с проектными нормами 0,18 мкм, по критерию сохранности состояния. Описаны особенности деградации ячеек памяти, экспериментально определена энергия активации деградационных процессов.

Ключевые слова: надежность ЭКБ; старение ЭКБ; энергия активации (E_a); электрически стираемое перепрограммируемое ПЗУ; EEPROM.

Возможность ячеек памяти сохранять накопленный заряд на плавающем затворе является важнейшей характеристикой электрически стираемого программируемого ПЗУ (EEPROM), поскольку фактически определяет время хранения данных. Известно, что ячейки памяти с плавающим затвором имеют тенденцию терять заряд при воздействии таких дестабилизирующих факторов как время эксплуатации, количество циклов перезаписи, температура, радиация и т. д. [1–2].

Ускоряющим фактором для большинства механизмов отказа, в том числе для пробоя тонкого подзатворного диэлектрика и утечки заряда с плавающего затвора, является повышенная температура. Поэтому одной из наиболее распространенных и общеизвестных техник является хранение устройства при повышенных температурах, а затем оценка его срока эксплуатации в нормальных условиях либо при другой интересующей температуре. Эта оценка, как правило, основана на законе Аррениуса, который используется для описания скорости протекания физико-химических реакций. Чтобы определить коэффициент ускорения, необходимо знать энергию активации. Методика расчета энергии активации (E_a), которая основана на проведении испытаний на хранение при повышенных температурах [3].

Проведено исследование, направленное на определение энергии активации деградационных процессов ячеек памяти EEPROM, выполненных по КМОП-технологии с проектными нормами 0,18. Температура испытаний до 300 °С.

Испытания проводятся на пластинах, содержащих различные конфигурации ячеек памяти EEPROM:

- массив из 10 000 параллельно соединенных ячеек EEPROM;
- стандартная ячейка EEPROM;
- уменьшенная ячейка EEPROM;
- увеличенная ячейка EEPROM.

Далее ячейки памяти на пластине в шахматном порядке переводятся в состояние «стерто» или «записано». На части ячеек предварительно проводится



циклование, т. е. многократный перевод из состояния «стерто» в состояние «записано». Количество циклов перезаписи — 100 000.

Пластины выдерживаются при повышенной температуре без электрической нагрузки в течение времени испытания. В процессе испытаний в контрольных точках измеряется пороговое напряжение (U_{TH}).

Обработку результатов испытаний для каждой температуры проводят методом прогнозирования изменения во времени параметров-критериев годности изделий. Для каждого образца методом наименьших квадратов зависимость $U_{TH}(t)$ аппроксимируется линейной функцией и определяется величина характеризующая скорость изменения порогового напряжения. Для каждой температуры проводят определение энергии активации (Ea) в модели Аррениуса, описывающей ускорение деградационных процессов при увеличении температуры испытаний [4].

В ходе исследования наблюдается резкая деградация параметров в начальный момент времени с последующим замедлением деградационных процессов. Это может быть причиной ранних отказов ИМС на основе EEPROM. Для минимизации таких эффектов целесообразно введение технологической отбраковки по следующей процедуре: программирование всего массива памяти; выдержка без электрической нагрузки при повышенной температуре 200–300 °С не менее 48 часов; проведение полного функционального контроля (ФК) микросхем со считыванием хранимой информации. Микросхемы, успешно прошедшие ФК и сохранившие исходный код, могут считаться надежными.

Энергия активации деградационных процессов определена для двух диапазонов температур. Для каждого из диапазонов значения составляют:

При температуре до 200 °С в среднем $Ea = 0,54$ эВ.

В диапазоне температур 200–300 °С в среднем $Ea = 0,46$ эВ.

В дальнейшем полученные значения энергии активации будут использованы при проведении ускоренных испытаний ячеек памяти EEPROM по критерию сохранности состояния.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника. 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
3. Строгонов А. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности, 2007. — № 3. — С. 90–96.
4. ГОСТ Р. 57394–2017 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые // Методы ускоренных испытаний на безотказность. — М.: Стандартинформ, 2017.

УДК 621.315.592.01

Сравнительный анализ ReRAM на базе high-k-диэлектриков

Макеев В. В., к. т. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Рассмотрены параметры электронных структур high-k диэлектриков, используемых в качестве функциональных слоев ReRAM элементов памяти. Сделан вывод о наиболее предпочтительном выборе оксида тантала в качестве функционального слоя, который обеспечивает более низкие напряжения формовки и более высокие рабочие токи.

Ключевые слова: ReRAM элементы памяти; high-k диэлектрики; электронная структура; прочность связей ионов кислорода с решеткой.

Введение

Среди множества материалов, используемых в качестве функциональных слоев памяти ReRAM, весьма перспективными являются структуры на основе оксидов переходных металлов, таких как TaO_x, TiO₂, HfO₂, ZrO₂, Al₂O₃, которые еще называют high-k-диэлектриками и которые на сегодняшний день хорошо освоены полупроводниковой промышленностью [1–6].

Эти оксиды и, соответственно, элементы памяти на их основе имеют некоторые общие черты, и в первую очередь механизм резистивного переключения, который основан на создании токопроводящего филамента из кислородных вакансий. Во многих работах подтверждается перспективность памяти на данных оксидах, но чтобы выбрать подходящий материал для производства приборов памяти, необходимо оценить предполагаемые (ожидаемые) параметры элементов памяти относительно к используемым различными авторами технологиям изготовления и методикам тестирования, то есть опираясь только на электрофизические параметры и электронную структуру материала.

Анализ электронных структур материалов

Анализ электронных структур материалов, выбираемых в качестве функционального слоя в элементе памяти ReRAM для сравнения их влияния на характеристики приборов, можно провести по следующим параметрам [7, 8]:

- координационные числа атомов;
- постоянные решетки элементарных ячеек;
- электронные орбитали, формирующие дефектные уровни, то есть внешние электронные орбитали;
- ширина запрещенной зоны;
- расположение уровней кислородных вакансий в запрещенной зоне, то есть расстояние от уровней отрицательно (E_d^-) и положительно (E_d^+) заряженных вакансий относительно дна зоны проводимости (E_c) и потолка валентной зоны (E_v), определяющих высоту энергетического барьера для носителей заряда на вакансиях;
- значения энергий захвата электронов и дырок на кислородные вакансии;
- диэлектрические постоянные.



1 — для всех рассматриваемых оксидов координационные числа у кислорода меньше, чем у металла, то есть во всех случаях для образования вакансий кислорода требуется разрыв меньшего числа связей, чем для образования вакансий металла, что объясняет механизм переключения за счет миграции ионов кислорода, а не за счет ионов металлов.

2 — Сравнивая координационные числа, постоянные решетки и внешние электронные орбитали, наиболее жестко связанным, то есть наименее «способным» к ионизации из рассматриваемых оксидов можно считать γ -TiO₂, поскольку постоянные решетки и номера орбиталей у него самые минимальные, а координационное число кислорода среднее из всех. По той же логике наиболее «способными» к ионизации можно отнести оксид тантала (δ -Ta₂O₅) и оксид гафния (η -HfO₂), причем в большей степени оксид тантала. Более легкое освобождение иона кислорода для последующей миграции должно сказаться на более легком формировании токопроводящего филамента, то есть на более низких напряжениях формовки.

3 — во всех случаях захват электронов на вакансиях кислорода более вероятен, чем захват дырок, и минимальный барьер при захвате электронов на вакансию и переходе его в зону проводимости имеют δ -Ta₂O₅ и γ -TiO₂. Отмечается, что для η -HfO₂ наблюдаются дефектные состояния в зоне проводимости [7], что вероятно скажется на увеличении проводимости. Таким образом более низкие рабочие напряжения и более высокие рабочие токи следует ожидать у структур на базе δ -Ta₂O₅, η -HfO₂ и γ -TiO₂ что, вероятно, скажется на значениях этих параметров в состоянии LRS. Наименее предпочтительными параметрами переключения, согласно нашей логике и приведенным данным, должны иметь структуры на базе γ -Al₂O₃. Согласно литературным данным [7] для Al₂O₃ характерна низкая плотность электронных состояний вблизи дна зоны проводимости, что согласуется с последним выводом.

Заключение

Исходя из приведенных качественных оценок электронных структур и параметров high-k-диэлектриков, таких как: TaO_x, TiO₂, HfO₂, ZrO₂, Al₂O₃;

- наиболее приемлемыми с точки зрения напряжения формовки и скорости переключения (Switching speed) для создания на их основе ReRAM элементов памяти являются оксиды тантала — TaO_x,
- перспективными оксидами для ReRAM элементов памяти являются оксиды гафния (HfO₂) и циркония (ZrO₂),
- наихудшие характеристики и по скорости переключения, и по долговечности должны иметь структуры на базе Al₂O₃.

Литература

1. Young-Bae Kim, Chang-Jung Kim, Seo D. H., Seo S., U-In Chung, In Kyeong Yoo and Kinam Kim. A Fast, High-Endurance and Scalable Non-Volatile Memory Device Made from Asymmetric Ta₂O₅-X/TaO₂-X Bilayer Structures // Nature materials, 2011. DOI: 10.1038/NMAT3070.
2. Seong Keun Kim, Yung Joon Choi, Бен Джун Чой. Resistive Switching of Ta2O5-Based Self-Rectifying Vertical-Type Resistive Switching Memory // Journal of Elec Materi, 2018. 47:162-166. DOI: 10.1007/s11664-017-5787-z.
3. Yang J. J., Zhang M.-X., Strachan J. P., Miao F., Pickett M. D., Kelley R. D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R. S. High switching endurance in TaOx memristive device // Applied Physics Letters, 2010. 97, 232102.

4. Zhuk M., Zarubin S., Karateev I., Matveyev Yu., Gornev E., Krasnikov G., Negrov D. and Zenkevich A. On-Chip TaOx-Based Non-volatile Resistive Memory for in vitro Neurointerfaces // Original Research published: 26 February 2020. DOI: 10.3389/fnins.2020.00094.
5. Lee H. Y., Chen P. S., Wu T. Y., Chen Y. S., Wang C. C., Tzeng P. J., Lin C. H., Chen F., Lien C. H. and Tsai M.-J. Low Power and High Speed Bipolar Switching with A Thin Reactive Ti Buffer Layer in Robust HfO₂ Based RRAM. DOI: 10.1109/IEDM.2008.4796677.
6. Yang J. J., Pickett M. D., Li Xuema, Ohlberg D. A. A., Stewart D. R. and Williams R. S. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // Nature nanotechnology, 2008. Vol. 3.
7. Гриценко В.А., Перевалов Т.В. Физика диэлектрических пленок: атомная и электронная структура. — РАН СО ИФП, 2015.
8. Лосев А.Л., Гриценко В.А. Синтез, свойства и применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в кремниевых приборах. — Новосибирск, СО РАН, 2011.



УДК 621.389

Формирование волноводных структур методом плазменного травления через фоторезистивную маску для производства фотонных интегральных схем

Терентьев А. В., Абросимов В. Ю., Светиков В. В., Розанов Р. Ю.,
Фролова Г. В.

*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
Terentev@zntc.ru*

Разработана методика формирования волноводных структур методом плазменного травления через фоторезистивную маску для производства элементов интегральной фотоники. Определен химический состав травящей газовой среды, описаны особенности технологического процесса плазмохимического травления.

Ключевые слова: плазменное травление; фотонная компонентная база.

Одним из приоритетных направлений развития современной электроники является интеграция в ее состав фотонных интегральных схем (ФИС), предназначенных главным образом для осуществления передачи и приема больших объемов информации. Это направление получило название «оптический интерконнект». Он охватывает приборные решения для всего спектра передач данных, начиная от магистральных межконтинентальных сетей и заканчивая передачей данных внутри отдельно взятого микропроцессора. Для задач с таким широким целевым назначением применяется широкий спектр технологических решений. Одним из них является использование технологии изготовления низкоконтрастных волноводов. Такие технологии используются для изготовления широко применяемых в современных оптических сетях оптических мультиплексоров, являющихся ключевым компонентом сетей со спектральным уплотнением — сетей DWDM и CWDM. В настоящее время основной технологией изготовления таких устройств является технология на основе SiO_xGe_y -волноводов. При изготовлении волноводов одними из ключевых требований являются равномерность слоя по коэффициенту преломления и высоте, гладкость поверхностной грани и боковых стенок волноводов, форма профиля волновода.

В работе приведены результаты отработки технологического процесса ПХ-травления волноводного слоя для создания канальной волноводной структуры ФИС. В технологических процессах использовалось травление в индуктивно связанной плазме через фоторезистивную маску при использовании травящей газовой смеси $\text{Ar}+\text{CHF}_3$.

Использование травящей газовой смеси $\text{Ar}+\text{CHF}_3$ позволило получить отклонение от вертикальности боковых стенок менее 10° , а также селективность травления к фоторезисту более 4. При этом шероховатость R_a боковых стенок вытравленных элементов составила 32 нм. Такое сочетание характеристик технологического процесса позволяет применять данную технологию для формирования волноводных структур в слоях SiO_xGe_y .

В работе представлена зависимость профиля травления и селективность от рецептуры травящей газовой смеси.

Данная работа выполнялась специалистами АО «ЗНТЦ» с использованием возможностей собственного кристалльного производства, лаборатории фотоники, а также привлечением инструментария ЗИТЦ, в частности растрового электронного микроскопа FEI quanta.

Литература

1. Young-Gwang Kim, Hyug-Gyo Rhee, Young-Sik Ghim, Yun-Woo Lee. Method of fabricating an array of diffractive optical elements by using a direct laser lithography // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. Vol. 101. P. 1681–1685.
2. Radtke D. and Zeitner Uwe D. Laser-lithography on non-planar surfaces // Optics Express, 2007. Vol. 15. Issue 3. P. 1167–1174.



УДК 539.232

Влияние отжига на температурный коэффициент сопротивления терморезистивного слоя оксида ванадия

Ерастов Д. А., Жукова С. А., Ульянов С. А., Трошин Б. В., Столяров Д. Е., Шкаликов М. С.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

mail@cniihm.ru

В настоящем докладе сообщается о результатах исследований влияния отжига на температурный коэффициент сопротивления терморезистивного слоя оксида ванадия (VO_x).

Ключевые слова: магнетронное распыление; ИК-детекторы; оксид ванадия (VO_x); тепловизионные приборы.

Введение

В качестве термочувствительного слоя неохлаждаемого микроболометра в настоящее время наиболее широко применяют полупроводниковые пленки оксидов ванадия смешанного состава (VO_x). Осаждение пленок оксида ванадия, состоящих только из одной стабильной фазы, — достаточно трудоемкая задача вследствие изменения окислительно-восстановительных условий в процессе реактивного магнетронного осаждения и образования локальных областей с содержанием кристаллических структур VO_2 , V_2O_3 и V_2O_5 [1]. Авторы вышеупомянутой работы предлагают повышать ТКС со стабильным получением пленок методом прогрева образцов в процессе формирования слоя VO_x или после осаждения пленок путем отжига при температуре около 500°C . Однако высокие температуры (более 200°C) могут привести к деформации мостиковых структур [2]. В связи с этим необходимо использовать при отжиге VO_x такой интервал температур, который не приведет к деформации структур и обеспечит релаксацию напряжения пленки.

Отжиг VO_x и его влияние на ТКС

В качестве подложки использовались кремниевые пластины 150 мм со слоем нитрида кремния (200 нм), а контроль сопротивления и температурного коэффициента сопротивления осуществлялся на четырехзондовой установке. Процесс изменения температурного коэффициента сопротивления заключался в повышении температуры с 25 до 195°C с шагом 10°C , стабилизацией и выдержкой 15 секунд на каждом этапе повышения температуры. ТКС замерялся при температуре 25°C . В ходе исследований по отжигу VO_x в различных средах и при различных температурах было выявлено, что при отжиге в среде азота (до 200°C) тонкие пленки оксида ванадия стали обладать увеличенным ТКС. Поэтому в рамках данной работы отжиг проводился в среде азота N_2 . Полученные данные показывают, что продолжительный отжиг при температуре 195°C не ухудшает характеристик тонких пленок VO_x и при этом не приводит к деформации жертвенного слоя и мостиковых структур мультиплексора. Температурный коэффициент сопротивления в рабочем диапазоне составил $2,2$ – $2,5\%$ /град. На рис. 1 показана зависимость изменения сопротивления пленки VO_x от температуры отжига, а на рис. 2 приведена зависимость изменения температурного коэффициента сопротивления от температуры отжига.

При многократном отжиге образцов (более десяти циклов) в среде азота N_2 наблюдалось падение сопротивления и ТКС с их последующей стабилизацией (рис. 3 и 4).

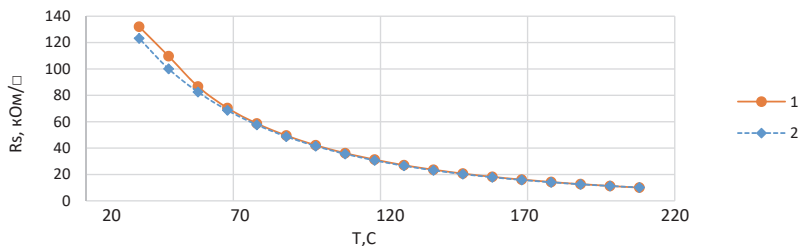


Рис. 1. Зависимость сопротивления R_s от температуры отжига. Т: 1 — нагрев; 2 — охл

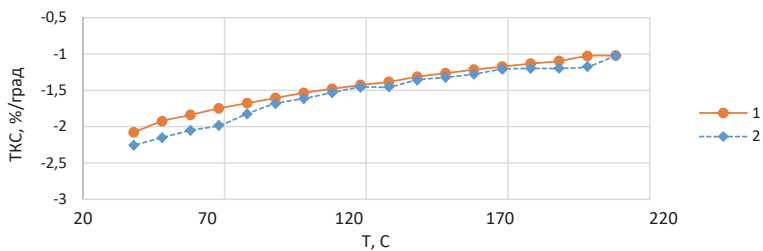


Рис. 2. Зависимость ТКС от температуры отжига. Т: 1 — нагрев; 2 — охл



Рис. 3. Зависимость сопротивления R_s от количества циклов отжига



Рис. 4. Зависимость ТКС от количества циклов отжигов (при температуре 25°C)

Заключение

Таким образом, многократный отжиг (более десяти циклов) тонких пленок VO_x до 200°C обеспечивает релаксацию напряжения пленки и не деформирует структуру микроболометрической матрицы. Температурный коэффициент сопротивления пленок VO_x в рабочем диапазоне составил 2,2–2,5%/град, что привело к увеличению чувствительности микроболометрических матриц на 10%. Для большего увеличения ТКС авторы предполагают продолжить работы с дополнительным повышением температуры подложки свыше 100°C при реактивном магнетронном распылении мишени ванадия с подачей напряжения смещения.

Литература

1. Зеров В. Ю., Куликов Ю. В., Маляров В. Г. и др. Пленки VO_x с улучшенными болометрическими характеристиками для ИК-матриц // Журнал технической физики, 2001. — Вып. 9. — Т. 27. — С. 57–63.
2. Жукова С. А., Турков В. Е., Обижаев Д. Ю., Рискин Д. Д., Четверов Ю. С. Особенности технологии изготовления высокочувствительных неохлаждаемых микроболометрических матриц // Нано- и микросистемная техника, 2014. — № 5. — С. 41–47.

УДК 538.91, ББК 22.379

Влияние методов сухого травления на электрические характеристики и спектры глубоких центров в наносветодиодах**Поляков А. Я.¹, Ли И.-Х.², Ким Т.-Х.², Черных А. В.¹, Скориков М. Л.³, Якимов Е. Б.^{1,4}, Алексанян Л. А.¹, Щемеров И. В.¹, Васильев А. А.¹, Пиртон С. Дж.⁵**¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»**119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1**laleksanian@misis.ru*² *Университет Корё**145 Anap-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Республика Корея*³ *Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН**119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*⁴ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН**142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*⁵ *Университет Флориды**Gainesville, FL 32611, Соединенные Штаты*

Рассмотрены методики обработки и пассивации боковых стенок в наносветодиодных структурах на основе GaN, полученных методом сухого травления, и влияние этих методов на характеристики. Были изучены электрические характеристики, электро- и фотолюминесцентные характеристики, спектры глубоких уровней.

Ключевые слова: наносветодиоды; нитрид gallия; сухое травление; глубокие центры.

Введение

Наносветодиоды с множественными квантовыми ямами (МКЯ) на основе нитридов III группы являются перспективными источниками света [1]. При подходе «сверху вниз» к изготовлению наносветодиодов одной из проблем является ионно-индуцированное повреждение, вызванное сухим травлением боковых стенок светодиодов. Это повреждение образует в боковых стенках точечные дефекты высокой плотности, что искривляет зоны на поверхности и усиливает безызлучательную рекомбинацию [2].

Методы снижения влияния сухого травления на светодиодные структуры

Структуры излучали свет вниз через сапфировую подложку. Были проведены измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ), вольт-фарадной характеристики (ВФХ) в темноте и при монохроматическом освещении, спектров адмиттанса, измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) и спектров релаксационной спектроскопии глубоких уровней с электрической (РГСУ) и оптической (ОРГСУ) инжекцией.

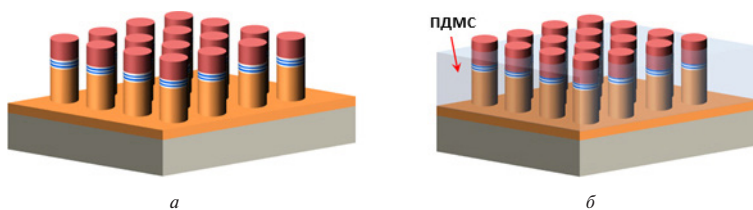


Рис. 1. Схематическая структура образцов 2 (а) и 7 (б)

Таблица 1. Описание образцов

№	Тип обработки	IQE (%)
1	Планарный, без обработки	62
2	Наностолбики, протравленные	13,6
3	Обработка БТО (N_2 , 30 с) + КОН (3 М, 70 °С, 10 мин)	30,7
4	Травление в КОН без БТО	—
5	Обработка БТО + КОН с погружением в $(NH_4)_2S$ на 1 ч	44,8
6	Обработка КОН + $(NH_4)_2S$ без БТО	—
7	Образец 5 + ПДМС	—
8	Образец 6 + ПДМС	—

Спектры ФЛ при комнатной температуре (КТ) состояли из основной полосы ФЛ 457 нм, обусловленной квантовыми ямами (КЯ), и дефектной полосы 590 нм, обусловленной дефектами в КЯ (рис. 2). Интенсивность сильно уменьшается при переходе к КТ из-за сильного влияния безызлучательной рекомбинации.

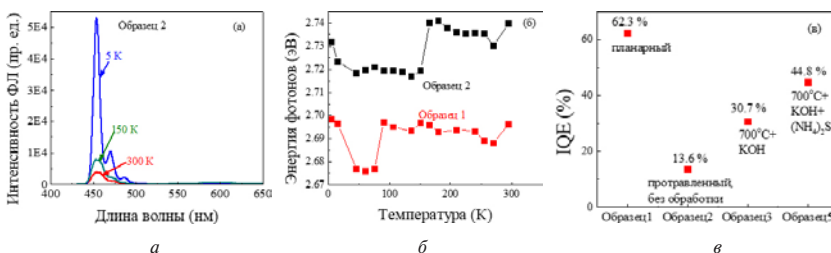


Рис. 2. Спектры ФЛ образца 2 (а); изменение энергии фотонов для образца 1 и 2 (б); IQE для полосы 457 нм (в)

ВАХ при КТ для планарного образца 1 и образцов 7 и 8 сравниваются на рис. 3. Видно, что травление в КОН и пассивация в $(NH_4)_2S$ приводят к вполне удовлетворительному повышению эффективности ФЛ структур, но необходим дополнительный отжиг образцов (700 °С) для уменьшения обратной утечки.

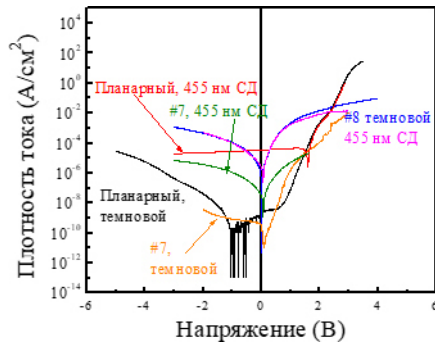


Рис. 3. ВАХ планарного светодиода и двух светодиодов, инкапсулированных в ПДМС

Доминирующей чертой в спектрах РСГУ является электронная ловушка с уровнем около $E_c - 0,7$ эВ и сечением захвата электронов 10^{-16} см^2 (рис. 4). Такие электронные ловушки наблюдаются в КЯ InGaN/GaN и считаются подобными азотным межузельным ловушкам $E_c - 1$ эВ в n-GaN [3]. Эта ловушка является центром безызлучательной рекомбинации, и увеличение ее плотности может объяснить более низкую IQE наносветодиодов, чем у планарного образца, даже после обработки стенок.

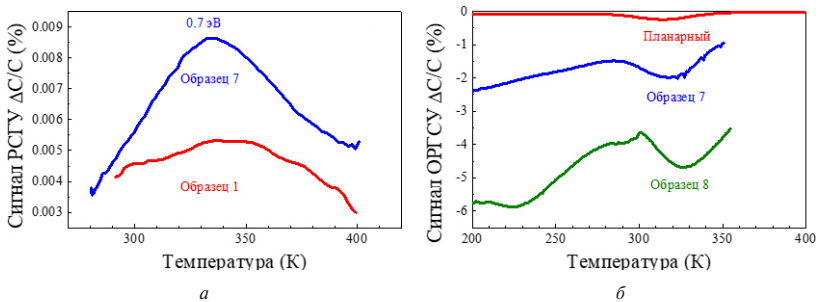


Рис. 4. Спектры РСГУ (а) ОРСГУ (б) для планарного светодиода и образцов 7 и 8

Заключение

Интенсивность ФЛ наносветодиодов, полученных сухим травлением, может быть увеличена по сравнению с планарным образцом путем БТО при 700°C в сочетании с травлением КОН и пассивацией в $(\text{NH}_4)_2\text{S}$. Простое травление или травление с пассивацией серой дает высокую интенсивность ФЛ, но увеличивает утечку. Чтобы подавить ее, необходим дополнительный отжиг при 700°C .

Работа выполнена в рамках соглашения № 075-15-2022-1113 от 28 июня 2022 г. о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий в целях реализации федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», научного исследования «Новые радиационные явления в оксиде галлия и их применение в приборах»

Литература

1. Wong M. S., Nakamura S., DenBaars S. P. Review—Progress in High Performance III-Nitride Micro-Light-Emitting Diodes // ECS J. Solid State Sci. Technol., 2020. Vol. 9. № 1. P. 015012.
2. Fan Q. et al. Reactive ion etch damage on GaN and its recovery // J. Vac. Sci. Technol. B., 2006. Vol. 24. № 3. P. 1197.
3. Polyakov A. Y. et al. Post dry etching treatment of nanopillar GaN/InGaN multi-quantum-wells // J. Alloys Compd., 2021. Vol. 868. P. 159211.

УДК 539.612

Исследование адгезивных свойств эластичных кремнийорганических компаундов**Жумагали Р. Н., Горлов Н. С., к. т. н., Вертянов Д. В., д. т. н., Тимошенко С. П., Гладкова С. И.***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
Zhumagali_991@mail.ru*

Проведено исследование адгезивных свойств кремнийорганических компаундов, применяющихся для создания носимой биоэлектроники с возможностью растяжения. Приведены результаты экспериментальных исследований величин адгезии компаундов к металлам и диэлектрическим подложкам при механических воздействиях на отрыв.

Ключевые слова: эластичная электроника; измерение адгезии; механические деформации; кремнийорганические компаунды; носимая биоэлектроника; диэлектрическая подложка.

Применение эластичных носителей в электронике позволяет разрабатывать устройства, где необходимо обернуть эластичное основание на криволинейной поверхности или интегрировать с биологическими тканями, что невозможно при применении традиционных жестких или гибких оснований. Возможность адаптации формы устройства во время использования может быть полезна в медицине, биоэлектронике, робототехнике и других областях.

В качестве материала для формирования эластичных подложек используют кремнийорганические компаунды, в частности полидиметилсилоксан (PDMS) SYLGARD 184 компании Dow Corning. Полидиметилсилоксан — нетоксичный, биосовместимый и, что самое главное, высокопластичный материал. Также он обладает оптической прозрачностью (до области дальнего УФ-излучения) и устойчивостью к большинству растворителей и кислот. Благодаря этому он совместим со многими технологическими процессами. Однако он обладает очень низкой поверхностной адгезией и низким модулем упругости, что приводит к сложностям при традиционных методах нанесения металлов. В результате поверхность металла трескается и происходит разрыв цепей [1–2].

Было проведено моделирование эластичных подложек в САПР Comsol Multiphysics с металлическими проводниками различных исполнений: подковообразной формы, треугольной формы и в форме прямоугольного меандра. Структура разрабатываемого эластичного шлейфа состоит из медного проводника, кремнийорганического компаунда и полиимидного лака. На основании результатов моделирования была выбрана подковообразная форма в виде скругленных меандров, показавшая лучшие результаты, со следующими параметрами: ширина проводника — 0,1 мм, амплитуда меандра — 1,3 мм, радиус меандра — 0,35 мм (рис. 1).



Рис. 1. Форма проводников в эластичных подложках

В процессе эксплуатации эластичного шлейфа медный проводник будет подвержен постоянной деформации, изгибам, скручиванием и растяжениям. Это повлечет изменения как электрических свойств медных проводников, так и адгезивных свойств эластичных кремнийорганических компаундов. Плохая адгезия в процессе эксплуатации приведет к отрыву медных проводников от кремнийорганического компаунда. Это может привести к потере электрического контакта, короткому замыканию или более скорому износу медных проводников. В процессе подбора кремнийорганического компаунда с наилучшими показателями адгезивных свойств были исследованы такие кремнийорганические компаунды, как «Универсал», «Смартсил СТ-501», «СИЭЛ 159-322А», «Смартсил СТ-503».

Была использована методика определения прочности на отслаивание в нормальных атмосферных условиях, указанная в ГОСТ 23752.1-92 [3]. Результаты испытания выражены в ньютонах на миллиметр ширины проводника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00959)

Литература

1. Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П. Эластичные основания и межсоединения в носимой биоэлектронике и перспективы их применения // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: Сборник трудов научно-практической конференции. — Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус, 01–07 февраля 2022 года. — Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2022. — С. 112–118.
2. Ponomarev N., Vertyanov D., Nikolaev V., Timoshenkov S. Research of the Constructions of Conductors on Flexible Carriers // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018. P. 1626–1628.
3. ГОСТ 23752.1-92. Платы печатные. Методы испытания. Издание официальное: государственный стандарт СССР: дата введения 1993-01-01 / Комитет стандартизации и метрологии СССР. — Изд. официальное. — М.: издательство стандартов, 1993. — С. 17–18.

УДК 538.91

Методы повышения отказоустойчивости микросхем памяти ReRAM с учетом разброса по количеству операций записи

Теплов Г. С.^{1,2}, к. ф.-м. н., Константинов В. С.^{1,2}, Петрова С. И.²¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрены основные методы повышения отказоустойчивости микросхем памяти ReRAM. Помимо классических подходов повышения отказоустойчивости предложен специфический для ReRAM метод перезаписи, который учитывает физику процесса переключения ReRAM.

Ключевые слова: ReRAM; CB-RAM; мемристор; отказоустойчивость; самокорректирующийся код; аппаратная избыточность; процедура записи.

Введение

Открытый в 2008 г. электронный компонент мемристор [1] успел пройти путь от лабораторных образцов до первых экспериментальных библиотечных компонентов. Исследовательскими технологиями энергонезависимой памяти ReRAM на его основе обладают порядка десятка компаний во всем мире [2], тем не менее переход к коммерческим технологическим решениям на основе ReRAM затруднен. Основные проблемы технологии связаны с разбросом параметров изготавливаемых компонентов [3]. Одним из ключевых параметров энергонезависимой памяти является ресурс переключений [4], который также подвержен разбросу и напрямую влияет на отказоустойчивость микросхемы памяти. В данной работе мы решили оценить влияние разброса количества циклов переключений от элемента к элементу на надежность матрицы памяти и рассмотреть возможные технические решения по нивелированию негативных эффектов разброса.

Методы повышения отказоустойчивости микросхем ReRAM

Классическими методами повышения отказоустойчивости микросхем являются использование самокорректирующихся кодов и введение аппаратной избыточности. Базовый подход к использованию самокорректирующихся кодов предполагает использование кода Хэмминга как наиболее легко реализуемого схемотехнического решения. Аппаратная избыточность основывается на введении дополнительных ячеек или слов, которые задействуются при отказе элементов и блоков хранения данных. Экспериментальные данные по ячейкам памяти ReRAM и элементам хранения демонстрируют разброс по количеству циклов переключения [5]. В качестве критерия отказа матрицы памяти выбрано снижение объема заявленной памяти в результате отказа ячеек и байтов.

Общее количество ошибок в зависимости от количества операций записи описывается равенством (1)

$$NE = \sum_{i=0}^n P(i) \cdot m, \quad (1)$$



где NE — общее количество ошибок, i — номер/индекс операции записи, n — количество операций записи, $P(i)$ — вероятность отказа ячейки памяти на i -й операции, m — общее число ячеек. Значение $P(0)$ соответствует проценту выхода годных ячеек.

Для случая, когда отказ определяется только самокорректирующимся кодом, вероятность отказа определяется (2)

$$P_f(NE) = \sum_{j=f}^{NE} \frac{C_j^f}{C_m} w, \quad \text{при } j \geq f, \quad (2)$$

$$f = corr + 1, \quad (3)$$

где P_f — вероятность отказа, f — критичное число ошибок (3), $corr$ — количество ошибок, исправляемых кодом, l — длина байта данных с контрольными разрядами, w — количество байтов в матрице, C — количество сочетаний без повторов. В случае $j < f$ отказ невозможен.

Для случая, когда отказ зависит только от избыточности байтов, количество допустимых ошибок лежит в диапазоне (4)

$$w_r < NE < w_r \cdot l + 1, \quad (4)$$

где w_r — количество резервных байтов матрицы.

Для процедуры записи слова предлагается использовать операцию, которая меньше расходует ресурс ячеек. В предлагаемой процедуре необходимость перевода всех ячеек в одно состояние (EEPROM, FLASH, SONOS) может быть заменена на операцию считывания слова. Затем считанная информация сравнивается побитно с необходимым к записи вектором, после чего в отличающихся ячейках необходимо провести операцию изменения сопротивления (переключения).

Заключение

Несмотря на разбивку процедуры записи на три операции, общее время выполнения изменится в большую сторону не критично. Энергопотребление процедуры снизится, т. к. считывание требует меньших мощностей, чем изменение сопротивления. Ресурс ячеек повысится, т. к. процедуре изменения сопротивления подвергнутся только необходимые ячейки.

Литература

1. Strukov D. V. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. № 7191. P. 80–83.
2. Choe J. Memory technology 2021: Trends & challenges // 2021 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). IEEE, 2021. P. 111–115.
3. Gismatulin A. A. et al. Charge transport mechanism in the metal–nitride–oxide–silicon forming-free memristor structure // Applied Physics Letters, 2020. Vol. 116. № 20.
4. Teplov G. et al. Memristor Degradation Analysis Using Auxiliary Volt-Ampere Characteristics // Micromachines, 2022. Vol. 13. № 10. P. 1691.
5. Lanza M. et al. Recommended methods to study resistive switching devices // Advanced Electronic Materials, 2019. Vol. 5. № 1. P. 1800143.

УДК 621.382

Исследование влияния режимов термического окисления на форму и размеры острия кремниевых игл кантилеверов

Новак А. В., к. т. н., Яворская М. Р., Ковалев В. Д., Соколов А. М.

АО «Ангстрем»

122460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3

Novak@angstrem.ru

Исследовано влияние различных режимов термического окисления в интервале температур от 900 до 1100 °С на размеры острия и форму кремниевых игл, получаемых методом анизотропного жидкостного травления в КОН. Показано, что окисление при температурах от 900 до 950 °С позволяет формировать иглы с радиусом острия менее 5 нм, а окисление при температурах от 1000 до 1100 °С позволяет формировать иглы с радиусом острия более 20 нм.

Ключевые слова: кремниевая игла; кантилевер; атомно-силовая микроскопия; термическое окисление; жидкостное анизотропное травление.

Кремниевая игла является важным элементом кантилеверов для атомно-силовой микроскопии (АСМ), эмиссионных катодов и в различных МЭМС-устройствах. С точки зрения применения кремниевых игл в различных областях одним из наиболее важных параметров иглы является радиус острия. Так, например, для получения АСМ-изображений с нанометровым разрешением и для эмиссионных катодов требуются острые иглы с радиусом острия менее 10 нм. В то же время при исследовании методами АСМ различных биологических объектов необходимы кантилеверы с иглами, имеющими достаточно большой радиус острия (более 20 нм). Известно, что для получения заданного радиуса острия иглы применяются процессы на основе термического окисления при различной температуре и окисляющей среде. Однако некоторые особенности технологии изготовления игл с заданным радиусом острия на основе термического окисления описаны в литературе недостаточно полно.

В настоящей работе изучается влияние различных режимов термического окисления на размеры острия и форму кремниевых игл, полученных методом анизотропного жидкостного травления в растворе КОН. Окисление проводилось в интервале температур от 900 до 1100 °С в атмосфере сухого или влажного кислорода.

Для изготовления кремниевых игл использовались пластины монокристаллического кремния, легированного бором с ориентацией (100). Сами иглы формировали методом анизотропного жидкостного травления в водном растворе КОН с использованием маски из SiO₂ в форме круга с диаметром 45 мкм. Концентрация раствора КОН составляла 70 %. Данные иглы образованы восемью кристаллографическими плоскостями из семейства {311} и {131}, аспектное отношение составляло 1,41, игла имела довольно большой радиус острия (20–40 нм). Далее для полученных кремниевых игл проводились процессы термического окисления при температурах от 900 до 1100 °С в атмосфере сухого или влажного кислорода. Сформировавшийся оксид кремния удаляли в буферном травителе. Геометрические характеристики игл измеряли при помощи РЭМ. Из РЭМ-изображений определяли радиус острия иглы и рассчитывали аспектное отношение, которое определялось как отношение высоты на определенном расстоянии от вершины к поперечному размеру иглы.

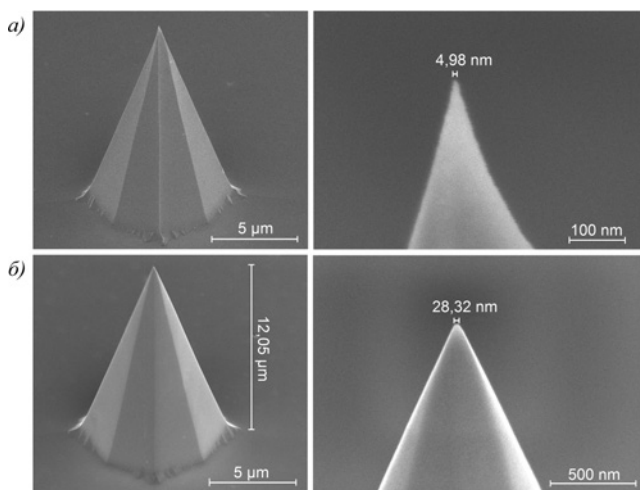


Рис. 1. РЭМ-изображения игл, подвергнутых пироокислению на толщину 500 нм при $T = 950$ (а) и $T = 1050$ °С (б)

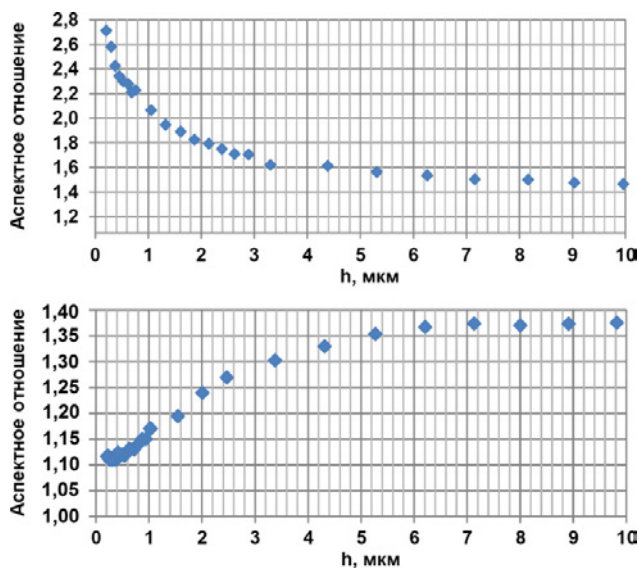


Рис. 2. Зависимости аспектного отношения на определенном расстоянии от вершины иглы h для образцов игл после пироокисления при $T = 950$ °С (а) и после пироокисления при $T = 1050$ °С (б)

Обнаружено, что заостряющее окисление при температурах от 900 до 950 °С позволяет формировать иглы с радиусом острия менее 5 нм (рис. 1а). Однако на таких иглах могут оставаться различные дефекты от травления самих игл в растворе КОН, которые даже могли становиться более выраженными. Аспектное отношение при малых температурах окисления (900–950 °С) увеличивается при приближении к острию иглы (при уменьшении расстояния h). Например, для игл, окисленных при 950 °С на толщину 500 нм, аспектное отношение увеличилось с 1,41 у самого основания до 2,7 на расстоянии 200 нм от вершины иглы (рис. 2а).

В то же время при более высоких температурах от 1000 до 1100 °С формируются иглы с радиусом острия более 20 нм, но при этом сглаживаются ребра и практически устраняются неровности и дефекты от травления (рис. 1б). Аспектное отношение при больших температурах окисления (1000–1100 °С) уменьшается при приближении к острию иглы. Для игл, окисленных при 1050 °С на толщину 500 нм, аспектное отношение уменьшилось с 1,41 у самого основания до 1,15 на расстоянии 200 нм от вершины иглы (рис. 2б).

Обнаружено, что двухэтапный процесс, состоящий из сглаживающего окисления при 1100 °С и последующего заостряющего окисления при 950 °С, позволяет получать иглы с радиусом менее 5 нм с высокой воспроизводимостью радиуса острия и формы иглы. Разработанный технологический процесс заострения на основе двухэтапного термического окисления был использован при изготовлении кремниевых кантилеверов.



УДК 621.3.049.77

Метод практической оценки требований к допускам на линейные размеры элементов топологии фотошаблонов для проекционной фотолитографии

Балан Н. Н., к. т. н., Жворонкин Ю. Г., Иванов В. В., к. ф.-м. н.,
Панкратов А. Л.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
nbalan@niime.ru

Описываются средства и методики, необходимые для реализации способа практической оценки требований к допускам на линейные размеры элементов рисунка фотошаблонов для проекционной фотолитографии.

Ключевые слова: проекционная фотолитография; фотошаблон; допуск на линейные размеры.

В производстве интегральных схем выход годных практически напрямую зависит от совершенства инструментария проекционной фотолитографии [1], в том числе от качества используемых фотошаблонов.

Геометрия фоторезистивной маски на пластине должна удовлетворять ряду требований, предъявляемых к минимальному полупериоду формируемого в фоторезисте рисунка (КЛР), допускам на размер элемента фоторезистивной маски при необходимой глубине фокуса, а также к точности совмещения [2]. Характеристики оборудования, фотошаблонов и используемых материалов, в свою очередь, должны обеспечивать возможность создания на полупроводниковой пластине рисунка, удовлетворяющего названным требованиям.

Внесение изменений в литографический процесс (например вынужденная замена материалов или каких-либо узлов установок экспонирования и обработки резиста) влечет необходимость пересмотра требований, предъявляемых к используемым фотошаблонам (и, возможно, к настроечным параметрам оборудования). В силу актуальности этой проблемы для отечественного полупроводникового производства в настоящее время представляется целесообразным привлечение средств и методов, позволяющих в подобных ситуациях производить практическую оценку изменившихся требований к литографическим инструментам, в частности к качеству рисунка на фотошаблоне, во избежание уменьшения выхода годных, обусловленного внесенными в процесс изменениями.

По мнению авторов, для решения описанной задачи требуются:

- комплект специализированных аттестационных фотошаблонов, организованных по принципу Picked-CD, предложенному компанией ASML для аттестации оборудования проекционной фотолитографии [3; 4], но содержащих топологические структуры, характерные для рассматриваемых литографических операций;
- средства моделирования литографического процесса;
- методы отъема и обработки результатов пропечатки аттестационных фотошаблонов, позволяющие выделить компоненты дозовой ошибки, соответствующие тому или иному ее источнику (качество рисунка на фотошаблоне,

неравномерность освещения, неоднородность обработки фоторезистивного стека и др.).

Описываемые в докладе вышеперечисленные средства и методы, в частности, позволяют реализовать способ практической оценки допусков на линейные размеры элементов рисунка на фотошаблоне.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Балан Н. Н., Жаворонкин Ю. Г., Иванов В. В., Панкратов А. Л., Харченко Е. Л. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 122–131.
3. Waelpoel J. A. C., van Schoot J. B. P., Zanzal A. G. Demonstrating next-generation CD uniformity with today's tools and processes // 17th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management / eds. J. A. Reynolds, B. J. Grenon. SPIE, 1997. Vol. 3236. P. 275–283.
4. Kiers T. et al. Reticule error correction for lithography tool qualification benefits and limitations // 20th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology / eds. B. J. Grenon, G. T. Dao. SPIE, 2001. Vol. 4186. P. 217–226.



УДК 621.315.592

Применение локальной перекристаллизации кремния методом термомиграции жидких зон в технологии силовой электроники

Середин Б. М.¹, Попов В. П.¹, Гаврус И. В.¹, Малибашев А. В.¹, Скиданов А. А.²¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

seredinboris@gmail.com

² АО «ВЗПП-Микрон»

394007, г. Воронеж, Ленинский просп., 119а

Обсуждается применение метода термомиграции дискретных жидких зон для создания сквозных микрообластей (каналов) заданной топологии в кремниевой пластине. Представлены результаты рентгеновских исследований кристаллического совершенства и электрофизические свойства полученных каналов и *p-n*-переходов приборов силовой электроники.

Ключевые слова: кремний; легирование; метод термомиграции; силовая электроника.

Введение

Уникальными достоинствами метода термомиграции жидких зон (ТМ) являются высокая скорость легирования кремния, превышающая на четыре порядка скорость твердотельной диффузии, постоянство концентрации легирующей примеси, резкость *p-n*-перехода, а также возможность менять соотношение ширины канала к его длине [1, 2]. ТМ на основе алюминия позволяет формировать в пластине кремния сквозные каналы или замкнутые ячейки *p*-типа проводимости, представляющие интерес для силовой электроники [3]. Целью работы является апробация возможности метода ТМ на примере создания кремниевых силовых тиристорov на токи до 100 А.

Структура силового тиристора

Для исключения поверхностного пробоя силового тиристора прямой полярности его нижний выпрямляющий *p-n*-переход выводится на верхнюю сторону структуры с помощью периферийной разделительной *p*-области в виде сквозных термомиграционных каналов и протравливается до получения лунки, поверхность которой пассивируется стеклом. Такой подход создает основы групповой технологии получения силовых приборов. Кроме того, он упрощает процесс пайки структуры на основание и имеет другие технологические преимущества.

Электрофизические свойства структуры тиристора

Рентгеновскими методами установлено, что каналы монокристалличны и эпитаксиальны исходной пластине. Величины деформаций в каналах и изгибов кристаллических плоскостей вблизи границ канал — исходная пластины составляют 10^{-5} – 10^{-4} и 10 – $15''$ соответственно. Удельная электропроводность ($\sim 0,02$ Ом·см) пропорциональна концентрации алюминия в канале ($\sim 1,0 \cdot 10^{19}$ см⁻³). При использовании кремния КЭФ-4,5 обратное напряжение *p-n*-перехода, соответствующее началу лавинного пробоя, достигает 250 В.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) имени М. И. Платова по программе FENN-2023-0005

Литература

1. Pfann W. G. Zone Melting. New York: John Wiley and Sons, 1963.
2. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. — М.: Металлургия, 1987.
3. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Особенности получения силовых кремниевых приборов методом термомиграции // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2015. — № 2–3 (236–237). — С. 105–115.

УДК 621.382

Исследование процессного окна Fin-слоя в процессе самосовмещенного двойного паттернирования

Тихонова Е. Д.^{1,2}, Горнев Е. С.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

yelena.tikhonova@phystech.edu

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена исследованию методов процесса мониторинга и контроля fin-слоев, полученных с помощью самосовмещенного двойного паттернирования с подрезанием. Обнаружен дефект «мышинный укус» и применена коррекционная модель для устранения данной проблемы.

Ключевые слова: фотолитография; разрешающая способность; самосовмещенное двойное паттернирование; моделирование; Fin-FET-транзисторы.

Введение

Переход к технологии 28 нм приводит к отказу от традиционных методов масштабирования и к использованию новых технологических методов для улучшения разрешения (resolution enhancement techniques, RET) фотолитографического процесса [1]. Процесс самосовмещенного двойного паттернирования (Self-Aligned Double Patterning, SADP) — один из самых используемых приемов для преодоления предела разрешающей способности, в частности при производстве Fin-FET-транзисторов [2, 3]. Такие устройства требуют соблюдения определенных правил конструкции плавника. Для достижения заданных требований используется метод подрезания [3]. Однако после получения желаемого рисунка мы обнаружили дефекты, способные повредить плавник.

Исследование способов улучшения качества контроля fin-слоев

Дефекты типа «мышинный укус» распределены по всей пластине, причем их число растет с увеличением радиуса пластины. В нашей прошлой работе мы выяснили, что повреждение плавника вызвано недостаточным покрытием SOC [4]. В настоящей работе мы решили затронуть способы улучшения мониторинга и контроля fin-слоев, полученных методом подрезания.

Для этого введем понятия «точность наложения слоев» (Overlay, OV) и «погрешность шага» (Pitch Walking, PW), определяемые формулами

$$OV = ЦМ_1 - ЦМ_2,$$

$$PW = CD_\alpha - CD_\beta,$$

где $ЦМ_1$ и $ЦМ_2$ — центры тяжести текущего и нижележащего слоев, CD_α и CD_β — промежуток между двумя соседними плавниками.

Теоретически расстояния D_1 и D_8 , а также D_2 и D_7 , D_3 и D_6 , D_4 и D_5 должны совпадать (рис. 1б), однако на деле оказывается, что D_7 существенно занижено, что указывает на недостаточное покрытие SOC. Расстояния между плавниками 2 и 5, а также между плавниками 5 и 8 (рис. 1б) вычисляются по формулам

$$D_{\text{Fin}2\text{toFin}5} = 3 \cdot CD_{\text{Fin}} + 2 \cdot CD_{\beta} + CD_{\alpha},$$

$$D_{\text{Fin}8\text{toFin}5} = 3 \cdot CD_{\text{Fin}} + CD_{\beta} + 2 \cdot CD_{\alpha}.$$

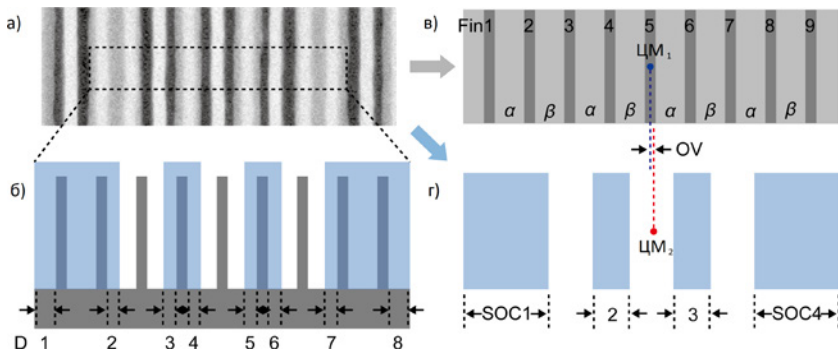


Рис. 1. СЭМ-изображение исследуемого блока (а), разность между расстоянием от краев слоя SOC до плавников (б), точность наложения слоев друг на друга (в, г)

Если все критические размеры плавников равны, то разница между $D_{\text{Fin}2\text{toFin}5}$ и $D_{\text{Fin}8\text{toFin}5}$ — это смещение между CD_{α} и CD_{β} , которое эквивалентно абсолютному значению PW. Проанализировав данные, обнаружили, что повреждение плавника обусловлено заниженным значением D_{γ} , сдвигом OV и PW.

Чтобы улучшить окно процесса Fin-слоя, применили корректирующие модели расстояния от края SOC до края плавников, OV и PW. На основе подсчета дефектов в каждой ячейке и соответствующего значения расстояния D_{γ} анализируется их линейная взаимосвязь (рис. 2а). Оказалось, что количество дефектов уменьшается при увеличении D_{γ} . Исходя из линейной подгонки модели, прогнозируется, что расстояния свыше 8,3 нм снизит показатель количества дефектов до нуля.

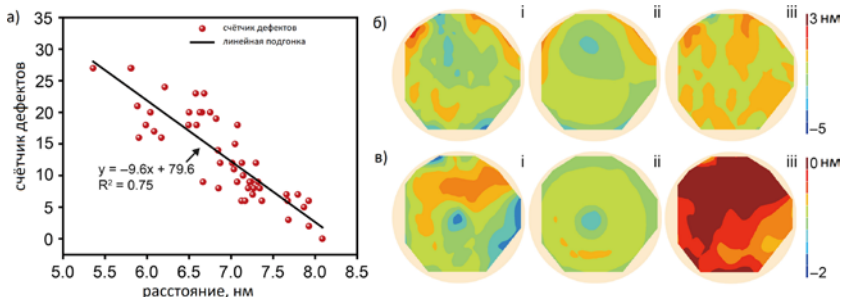


Рис. 2. Линейная зависимость количества дефектов от расстояния D_{γ} (а). Карта распределения OV (i), подобранная модель (ii), итоговая карта (iii) (б). Карта распределения PW (i), подобранная модель (ii), итоговая карта (iii) (в)



В соответствии с рис. 2б была подогнана модель третьего порядка, основанная на связи между OV и местоположением точки измерения на пластине. После применения модели ожидается, что стандартное отклонение будет снижено с 1,2 до 0,8 нм. Для распределения PW также была подогнана модель третьего порядка. После корректировки среднее смещение PW было уменьшено с 1 до 0 нм.

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что, измерив PW перед процессом подрезания, можно значительно уменьшить риск повреждения плавника за счет коррекционной модели. Таким образом, данная стратегия может быть интегрирована в процесс самосовмещенного двойного паттернирования с подрезанием для создания плавника в Fin-FET-транзисторах.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5–1 (102). — С. 13–19.
2. Баранов Г. В., Итальянцев А. Г., Красников Г. Я. Физические особенности и конструкции низкоразмерных транзисторных структур // Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Сборник докладов Международной конференции, Алушта, Крым, 28 сентября — 03 2015 года. — Алушта, Крым: ТЕХНО-СФЕРА, 2016. — С. 538–541.
3. Тихонова Е. Д. Моделирование профиля фоторезиста в процессе самосовмещенного двойного паттернирования с учетом коррекции проблемы горячих точек // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8–2 (113). — С. 602–604.
4. Тихонова Е. Д., Горнев Е. С. Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5–3 (102). — С. 859–861.

УДК 538.91

Формирование массивов металлических наночастиц на поверхности твердого тела для чувствительных слоев электронных устройств

Гришин Т. С.^{1,2}, Волкова Л. С.^{1,2}, Поляков М. В.¹, Михайлов И. А.¹, Громов Д. Г.²

¹ ИИМЭ РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 32а

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Предложен подход к созданию чувствительных слоев электронных устройств на основе массивов серебряных наночастиц. Массивы наночастиц на поверхности твердого тела формируются в результате отжига тонкого исходного слоя серебра. Выбор толщины исходного слоя и температуры отжига позволяет управлять оптическими и электрофизическими свойствами формируемого слоя.

Ключевые слова: металлические наночастицы; чувствительные слои; сенсоры; эволюция слоев; отжиг; магнетронное напыление.

Введение

Благодаря размерным и квантово-размерным эффектам и вызванным ими необычным физико-химическим, оптическим и электрофизическим свойствам массивы металлических наночастиц на поверхности твердого тела находят широкое применение. Слои на основе таких массивов применяются в электронных датчиках, а также в качестве катализаторов различных химических процессов, в качестве подложек для поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния, в медицине и множестве других областей. Наибольшее применение находят массивы наночастиц благородных металлов.

Формирование массивов наночастиц

Массивы металлических наночастиц могут быть сформированы в соответствии с несколькими распространенными подходами: с использованием методов жидкой химии или с применением литографических методов. Помимо этого, подобные массивы могут быть сформированы путем отжига тонкой металлической пленки [1]. Этот подход позволяет обеспечить большую однородность массивов наночастиц по сравнению с методами жидкой химии и отличается меньшей трудозатратностью по сравнению с литографическими методами.

Исходные слои серебра различной толщины формировались методом магнетронного распыления, они представляли собой островковые пленки, а их приведенная толщина не превышала 10 нм. В целях создания массивов с наперед заданными геометрическими параметрами проводилось исследование процесса эволюции исходного слоя и формирования массива наночастиц в результате отжига. Исходные слои подвергались отжигу в инертной среде при различных температурах от 80 до 400 °С. Эволюция слоев при температурах значительно ниже температуры плавления серебра обусловлена явлением гетерогенного плавления [2].



Методами атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии была изучена морфология каждого образца, соответствующего определенной толщине исходного слоя и определенной температуре отжига. Для избранных образцов были проведены элементные и кристаллографические исследования с помощью энергодисперсионной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Методами спектрофотометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния были изучены спектры пропускания и плазмонные свойства формируемых массивов, проведена корреляция оптических свойств массивов с их геометрическими параметрами.

Заключение

Формирование чувствительных слоев на основе массивов наночастиц серебра путем отжига тонкого исходного слоя отличается воспроизводимостью и однородностью формируемого массива. Геометрическими параметрами массива, а следовательно, и оптическими, каталитическими и электрофизическими свойствами слоя можно управлять путем выбора толщины исходного слоя и температуры отжига.

Диапазон температур, необходимых для получения массива с интересующими геометрическими параметрами, значительно ниже температуры плавления серебра и не превышает 400 °С, что обеспечивает совместимость описанного подхода с кремниевой технологией.

Литература

1. Gromov D. G. et al. Investigation of condensation of small portions of Ag at thermal evaporation in vacuum // J. Phys.: Conf. Ser., 2015. Vol. 643. P. 012014.
2. Громов Д. Г., Гаврилов С. А. Проявление гетерогенного механизма при плавлении малоразмерных систем // ФТТ, 2009. — Т. 51. — № 10. — С. 2012–2021.

УДК 538.91

Формирование чувствительных слоев на основе наностолбиков TiO_x для электронных устройств

Волкова Л. С.^{1,2}, Гришин Т. С.^{1,2}, Поляков М. В.¹, Михайлов И. А.¹, Громов Д. Г.²

¹ ИИМЭ РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 32а

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В данной работе приводятся результаты формирования массивов наностолбиков TiO_x , полученных методом двуступенчатого анодирования и декорированных наночастицами меди. Полученные слои проявляют каталитические и плазмонные свойства и могут быть использованы в качестве чувствительных слоев электронных устройств.

Ключевые слова: TiO_x ; наноструктуры; наностолбики; металлические наночастицы; чувствительные слои; анодирование; сенсоры.

Введение

В настоящее время отмечается рост задач по детектированию микро- и наноконцентраций вещества, катализу и проведению различных химических процессов с микро- и наноскопическим количеством образца. Решение этих задач возможно на наноструктурированных поверхностях, обладающих каталитическими и плазмонными свойствами. В данной работе предложена структура на основе наностолбиков TiO_x , декорированных медными наночастицами, сочетающая в себе эти свойства.

Формирование чувствительных структур

Массив наностолбиков TiO_x был получен в результате двухстадийного анодного окисления структуры $\text{SiO}_2/\text{TiN}/\text{Al}$ [1]. Декорирование наностолбиков TiO_x наночастицами меди проводилось в целях придания структуре плазмонных свойств. Наночастицы формировались путем отжига тонкой пленки меди, нанесенной на сформированную ранее структуру методом вакуум-термического испарения. В процессе отжига в атмосфере аргона пленка разрывалась и собиралась на вершинах наностолбиков в сферические наночастицы.

Геометрические параметры наностолбиков и наночастиц меди определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа. Методами электронной оже-спектроскопии и энергодисперсионного рентгеновского анализа был изучен элементный состав описываемых структур. Структурный анализ наностолбиков проводился с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Было установлено, что при отжиге TiO_x претерпевает структурные превращения при температурах значительно ниже указанных в диаграмме состояний для объемных материалов. Была проведена корреляция между структурными свойствами наностолбиков TiO_x и их каталитическими свойствами.

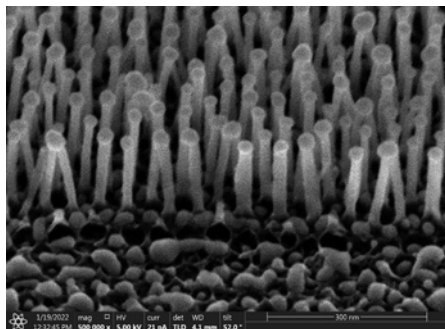


Рис. 1. СЭМ-изображение полученных структур

Плазмонные свойства формируемых структур определены путем регистрации спектров комбинационного рассеяния растворов красителей «малахитовый зеленый» и «родамин 6G» на поверхности сформированных массивов на длине волны возбуждения 532 и 633 нм и сравнения полученных спектров со спектрами этих растворов на инертной поверхности.

Заключение

Созданная структура на основе наностолбиков TiO_x сочетает в себе каталитические и плазмонные свойства, а предложенный метод ее создания совместим с полупроводниковой технологией. Определено наличие у предложенной структуры фото- и электрокаталитических, а также плазмонных свойства, что делает возможным применение подобных массивов наностолбиков TiO_x в качестве чувствительных, каталитических и других функциональных слоев различных электронных устройств.

Литература

1. Sorokina L. I. et al. The Composite TiO_2 — CuO_x Layers Formed by Electrophoretic Method for CO_2 Gas Photoreduction // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. № 14. P. 2030.

УДК 621.382

Концепция разработки проекта базовой методики оценки соответствия ЭКБ требованиям по стойкости к воздействию ИИ КП

Протопопов Г. А., Крылов Д. Г., Чубунов П. А., Скоркин И. В.*АО «НИИ КП»**111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53**protopopov_ga@orkkniikp.ru, krylov_dg@orkkniikp.ru, chubunov_pa@orkkniikp.ru, skorkin_iv@orkkniikp.ru*

Представлены предложения по структуре и основным положениям проекта базовой методики оценки соответствия изделий электронной компонентной базы требованиям по стойкости к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

Ключевые слова: ЭКБ; радиационная стойкость; одиночные радиационные эффекты; дозовые радиационные эффекты; ионизирующие излучения космического пространства.

С учетом введения в действие нормативных документов [1] и [2] необходимо их развитие, в том числе в части методик оценки соответствия изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) предъявляемым требованиям. Ионизирующие излучения космического пространства (ИИ КП) относятся к числу факторов, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на ЭКБ бортовой аппаратуры космических аппаратов. Таким образом, необходима разработка методики оценки соответствия ЭКБ требованиям по стойкости к воздействию ИИ КП.

В докладе представлены предложения по такой методике. Оценку соответствия предлагается осуществлять по группам эффектов: дозовые ионизационные, дозовые эффекты структурных повреждений, одиночные радиационные. Предложения в целом основаны на имеющемся опыте госкорпорации «Роскосмос» в части оценки соответствия ЭКБ требованиям по стойкости к ИИ КП, в частности используются методики, изложенные в отраслевых нормативных документах [3], в том числе изменение 1, [4]. Планируется также использовать опыт ранее разработанных проектов базовых методик. Разделы методики для каждой группы эффектов предлагается разбить на подразделы с описанием методов, с детализацией исходя из целей работы (оценка соответствия, определение фактического уровня стойкости). При этом будут учтены требования к содержанию стандартной типовой методики испытаний (условия, методы, оцениваемые характеристики, порядок, обработка и оценка результатов испытаний). Методика должна учитывать введенные в обновленные нормативные документы расчетно-аналитические методы. Перспективным предложением является использование по решению заказчика значения пороговых ЛПЭ в качестве показателей стойкости ЭКБ к воздействию ИИ КП по одиночным эффектам (помимо частоты эффектов).

Литература

1. ГОСТ РВ 0020.39.416-2020.
2. ГОСТ РВ 0020.57.415-2020.
3. ОСТ 134-1034-2012.
4. СТО ГК «Роскосмос» 04.01.0005-2022.

УДК 621.382

Чувствительный элемент для регистрации ЛПЭ ТЗЧ в бортовых электронных системах космических аппаратов

Бакеренков А. С., Чубунов П. А.

АО «НИИ КП»

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

bakerenkov_as@orckniikp.ru, chubunov_pa@orckniikp.ru

На основе результатов исследования характеристик чувствительного элемента для регистрации ЛПЭ ТЗЧ на базе эпитаксиально-планарной диодной матрицы сформулированы общие требования к чувствительным элементам данного типа, приведены схмотехнические примеры применения представленного изделия в бортовых электронных системах космических аппаратов.

Ключевые слова: чувствительные элементы; радиационная стойкость; диодные структуры; тяжелые заряженные частицы.

Основным параметром тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства с точки зрения воздействия на бортовую электронику космических аппаратов (КА) являются линейные потери энергии (ЛПЭ) в чувствительных областях изделий ЭКБ. Мониторинг фактического спектра ЛПЭ ТЗЧ в рамках космической миссии на борту КА позволяет повысить качество анализа причин сбоев и отказов бортовой электроники, а также скорректировать методики наземных испытаний ЭКБ космического назначения.

В данной работе представлен чувствительный элемент (ЧЭ) для регистрации ЛПЭ ТЗЧ на основе эпитаксиально-планарной диодной матрицы. Приведены результаты калибровки данного ЧЭ на пучках тяжелых ионов в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Московская область) [1]. Проведен анализ размеров чувствительной области с учетом результатов экспериментов по калибровке и параметров структуры $p-n$ -перехода ЧЭ. На основе проведенного анализа сформулированы требования для оптимизации топологии и структуры ЧЭ. Приведены примеры схмотехники интерфейсной обвязки ЧЭ, которая может быть реализована как на печатной плате, так и в формате интегральной микросхемы.

Литература

1. Anashin V.S. et al. Typical Facilities and Procedure for Single Event Effects Testing in Roscosmos // 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2015. P. 1–6.

УДК 621.38

Влияние мощности дозы фотонного излучения на величину выхода заряда в подзатворном оксиде МОП-структур

Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.

АО «Научно-исследовательский институт приборов»

140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8

m1705366@edu.misis.ru

На примере исследования реакции n -канальных МОП-транзисторов BS170 на статическое и импульсное воздействие фотонного излучения показана зависимость выхода заряда от мощности дозы.

Ключевые слова: МОП-транзистор; мощность дозы; выход заряда.

Введение

Основной причиной изменения параметров устройств, изготовленных по МОП-технологии, при воздействии на них ионизирующего излучения являются поверхностные эффекты, заключающиеся в накоплении заряда в оксиде и встраивании поверхностных состояний [1]. Величина отклонения контролируемого параметра от начального значения зависит от многих факторов, таких как суммарная поглощенная доза, электрический и температурный режим, топологические размеры образца. До недавнего времени считалось, что степень деградации МОП-структур не зависит от мощности дозы. Однако исследования приборов с толстыми оксидами позволили обнаружить наличие эффекта усиления деградации параметров подобных устройств при низкой интенсивности излучения. Было установлено, что независимо от технологии изготовления приборов подобные эффекты связаны с зависимостью выхода заряда от мощности дозы. В настоящей работе показано, что подобная тенденция сохраняется в том числе и для импульсного воздействия ионизирующего излучения.

Эксперимент

В качестве объектов исследования были выбраны n -канальные МОП-транзисторы BS170 с подзатворным диэлектриком из оксида кремния толщиной 50 нм. Эксперимент включал в себя облучение транзисторов изотопным источником ^{60}Co в статическом режиме при постоянной мощности дозы, равной 16,8 рад(SiO_2)/с, а также тормозным излучением ускорителей электронов при эффективной длительности импульса 24 нс, 71 нс и 1,5 мкс. Контролируемым параметром являлось пороговое напряжение (V_{th}) транзистора при постоянном значении тока между стоком и истоком, равном 1 мА.

Полученные дозовые зависимости сдвига V_{th} для различных режимов облучения представлены на рис. 1. Значения контролируемого параметра фиксировались в процессе воздействия гамма-излучения в статическом режиме и через 10 секунд после импульса тормозного излучения. Можно заметить, что наибольшая деградация транзисторов наблюдается при статическом режиме облучения, в то время как при импульсном воздействии сдвиг V_{th} уменьшается при сокращении длительности импульса при равных поглощенных дозах. Следовательно, в данном эксперименте наибольшая степень деградации МОП-структур соответствует меньшему значению мощности дозы.

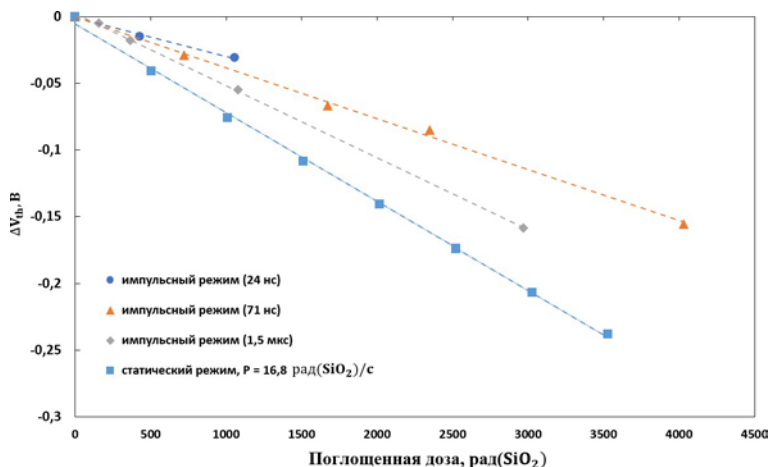


Рис. 1. Дозовые зависимости сдвига порогового напряжения МОП-транзистора при различных режимах облучения

Обсуждение результатов

С учетом неизменности температурного и электрического режимов на всех этапах испытаний наблюдаемый эффект можно объяснить зависимостью величины выхода заряда от мощности дозы излучения. При высокоинтенсивном облучении в толще подзатворного диэлектрика за короткое время генерируется большое число электронно-дырочных пар. Их концентрация настолько велика, что наблюдается значительный уровень начальной рекомбинации. Очевидно, что при увеличении мощности дозы будет возрастать как начальная плотность носителей заряда, так и скорость их рекомбинации, а значит, доля дырок, избежавших рекомбинации (то есть выход заряда), будет снижаться.

Без учета рекомбинационных и прочих потерь значение сдвига V_{th} будет определяться выражением

$$\Delta V_{th} = -\frac{\Delta Q}{C_0} = -\frac{q \cdot \frac{N_p}{V} \cdot t_{ox}}{\frac{\epsilon \epsilon_0}{t_{ox}}} = -\frac{q \cdot \frac{D \cdot m}{E_i} \cdot \frac{1}{V} \cdot t_{ox}}{\frac{\epsilon \epsilon_0}{t_{ox}}} = \frac{q \cdot D \cdot \rho \cdot t_{ox}^2}{\epsilon \epsilon_0 \cdot E_i}, \quad (1)$$

где D — поглощенная доза, рад(SiO₂); $\rho = 2,6$ г/см³ — плотность диоксида кремния; t_{ox} — толщина подзатворного диэлектрика; $\epsilon = 3,8$ — относительная диэлектрическая проницаемость SiO₂; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см — электрическая постоянная; $E_i = 17$ эВ — энергия ионизации в SiO₂ [2].

Сравнивая экспериментальные данные со значениями сдвига V_{th} , полученными по формуле (1), можно дать грубую количественную оценку величины выхода заряда для различных режимов облучения (табл. 1). Такой подход не учитывает влияние на выход заряда электрического поля в оксиде, что качественно не влияет

на сравнительную оценку ввиду равенства данного параметра на всех этапах эксперимента.

Таблица 1. Отношение экспериментального значения сдвига V_{th} к теоретическому

Режим облучения	импульсный, $t_{эфф} \approx 24$ нс	импульсный, $t_{эфф} \approx 71$ нс	импульсный, $t_{эфф} \approx 1,5$ мкс	статический
$\Delta V_{th(эксп)}/\Delta V_{th(теор)}$	0,28	0,33	0,41	0,63

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что высокая мощность дозы фотонного излучения может снижать эффективность встраивания заряда путем уменьшения доли непрорекомбинировавших дырок, что согласуется с полученными дозовыми зависимостями сдвига V_{th} .

Литература

1. Таперо К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники. — М.: МИСиС, 2013. — С. 225–227.
2. Weatherford T. From Carriers to Contacts, a Review of SEE Charge Collection Processes in Devices // Radiation Effects — From Particles to Payloads. IEEE NSREC Short Course, 2002. P. IV-1—IV-53.

УДК 621.382.2

Компенсационный метод повышения стойкости линейного стабилизатора напряжения

Дербунов И. В.¹, Брюхно Н. А.¹, Данцев О. О.¹, Кульченков Е. А.²,
Рыбалка С. Б.², Демидов А. А.²

¹ АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»

241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103

² Брянский государственный технический университет

241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7

ewgeniy2000@mail.ru

Разработаны дополнительные схмотехнические элементы в линейном стабилизаторе, образующие компенсационную обратную связь и позволяющие повысить его радиационную стойкость.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения; радиационная стойкость.

Введение

На сегодняшний день актуальной является задача повышения стойкости электронных компонентов к воздействию ионизирующего излучения [1]. В настоящей работе рассматривается метод повышения радиационной стойкости, основанный на изучении реакции отдельных элементов серийно изготавливаемой микросхемы линейного стабилизатора напряжения на накопленную дозу ионизирующего излучения.

Результаты и обсуждение

Приведено описание структуры и принципа работы дополнений к схеме линейного стабилизатора, а также представлены результаты его исследования на рентгеновском комплексе РИК-0401. Разработаны дополнительные схмотехнические элементы, образующие компенсационную обратную связь, вследствие чего выходное напряжение стабилизатора остается в пределах норм, установленных техническими требованиями, при больших значениях поглощенной дозы.

На рис. 1 приведена часть электрической схемы микросхемы стабилизатора отрицательного напряжения 5348EP035 (см. технические условия АЕНБ.431420.753-03 ТУ), где были проведены изменения.

В линейном стабилизаторе напряжения к инвертированному входу операционного усилителя подключена база дополнительного транзистора (VT2), коллектор которого подключен к положительной шине стабилизатора, а эмиттер через генератор тока — к отрицательной шине. Между выводом обратной связи и вторым входом операционного усилителя включен резистор, величина которого определяется по формуле

$$R = \beta \Delta U_{\text{он}} / I_r,$$

где β — коэффициент усиления транзистора VT2 после воздействия радиации; $\Delta U_{\text{он}}$ — изменение опорного напряжения относительно номинального после воздействия радиации; I_r — величина тока генератора в цепи эмиттера транзистора VT2.

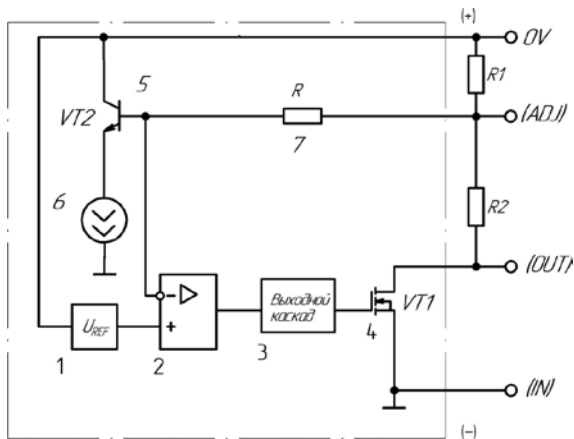


Рис. 1. Схема стабилизатора отрицательного напряжения: 1 — источник опорного напряжения; 2 — операционный усилитель; 3 — выходной каскад; 4 — выходной транзистор; 5 — дополнительный $n-p-n$ -транзистор; 6 — генератор тока; 7 — дополнительный резистор; 0V — положительная шина; ADJ — вывод обратной связи; OUT — выход стабилизатора; IN — отрицательная шина; R1 и R2 — делитель настройки напряжения стабилизации

При воздействии радиации модуль выходного напряжения источника опорного напряжения растет. Дополнительный транзистор является датчиком дозы облучения радиацией: чем больше доза радиации, тем меньше его коэффициент усиления в схеме с общим эмиттером. При этом при дозах менее 200 килорад величина коэффициента усиления транзистора VT2 меняется незначительно. Поскольку эмиттерный ток транзистора задается генератором тока 6, то при воздействии радиации ток в цепи базы возрастает и падение напряжения на резисторе R в цепи обратной связи также растет. Это приводит к росту напряжения на отрицательном входе операционного усилителя и уменьшению его выходного тока. Выходной транзистор VT1 приоткрывается, падение напряжения сток-исток увеличивается, тем самым стабилизируя напряжение на нагрузке.

Заключение

Показано, что дополнительные схемотехнические элементы образуют компенсационную обратную связь и позволяют повысить радиационную стойкость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замещение импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение от 9.02.2023 г. № 075-11-2023-008) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ

Литература

1. Gaul S. J., Vonno N., Voldman S. H., Morris W. H. Integrated Circuit Design for Radiation Environments. Wiley & Sons, 2019. 392 p.

УДК 621.396

Методология разработки ЛС-генераторов, управляемых напряжением

Савченко Е. М.¹, Сурков Н. С.^{1,2}, Кузьмин А. Д.¹, Брынцев И. В.^{1,3}

¹ ООО «ИнноЦентр ВАО»

107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 2, стр. 2, офис 40

² Физико-технологический институт РТУ МИРЭА

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Данная работа посвящена методологии по настройке основных параметров ЛС-генератора, управляемого напряжением (ГУН). В статье приведены графы зависимостей, которые описывают взаимодействия между отдельными частями схемы и выходными параметрами генератора. Представлен предельно простой план по разработке ЛС-генератора для достижения наилучших параметров схемы.

Ключевые слова: генератор; управляемый напряжением; ГУН; фазовый шум; методология; генератор Колпитца; запас отрицательного сопротивления; коэффициент включения варикапов; входная емкость ядра ГУН.

При проектировании генераторов, управляемых напряжением (ГУН), разработчики сталкиваются с проблемой настройки основных выходных характеристик: частоты генерации, коэффициента перестройки, мощности, фазового шума и тока потребления [1].

Основная цель данной методологии — переход от хаотичной последовательности действий по настройке генератора к четко построенному и предельно простому плану для решения поставленной задачи. Отсутствие четкой методологии приводит к затягиванию сроков разработки, превышению затраченного бюджета или же несоответствию параметров требованиям ТЗ.

В данной методологии все взаимосвязи между изменяемыми частями схемы и выходными характеристиками генератора представлены в виде графов зависимостей, которые позволят разработчикам получить более точную последовательность предстоящих действий. Данная методология рассмотрена на примере схемы емкостной трехточки (генератор Колпитца).

Для выполнения поставленной задачи разработчикам необходимо определить требования к генератору, управляемому напряжением, упростить и разбить на части общую схему ГУН, выявить взаимодействия частей схемы между выходными параметрами устройства, разработать план, основанный на обнаруженных зависимостях для достижения необходимого результата.

Первая глава включает в себя ориентированный граф зависимостей, демонстрирующий взаимосвязи и подробное описание всех изменяемых частей, влияющих на итоговые параметры схемы ГУН, что подтверждено соответствующими формулами [2, 3].

Во второй главе описаны методы снижения спектральной плотности мощности фазового шума. В этом разделе представлен граф зависимостей, который

упрощает понимание взаимосвязей между изменяемыми частями схемы и уровнем фазового шума [4, 5].

Основная проблема оптимизации схемы ГУН состоит в том, что во время разработки приходится учитывать несколько противоречивых требований одновременно, например высокую мощность и низкий ток потребления, большой коэффициент перестройки и низкий уровень фазового шума.

Можно сделать вывод о том, что все параметры связаны между собой и при изменении одной части схемы почти всегда будет происходить изменение сразу нескольких требуемых параметров. В таком случае необходимо искать компромисс для обеспечения наилучших характеристик генератора, управляемого напряжением.

Авторы считают, что применение данной методологии позволит упростить и оптимизировать процесс настройки LC-генераторов, управляемых напряжением, для обеспечения наилучших параметров конечного изделия.

Литература

1. Савченко Е. М., Будяков А. С., Баландин Д. А. Способы снижения уровня фазовых шумов СВЧ МИС генераторов, управляемых напряжением X диапазона частот на основе GaAs гетеробиполярных транзисторов // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2012. — С. 26–28.
2. Баранов А. В., Кревский М. А. Транзисторные автогенераторы гармонических СВЧ колебаний. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 276 с.: ил. — ISBN 978-5-9912-0934-2.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 832 с.: ил. — ISBN 5-94074-148-7.
4. Leeson D. B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum // Proc. IEEE. Vol. 54. Feb. 1966. P. 329–330.
5. Guillermo Gonzalez. Foundations of Oscillator Circuit Design. Boston: Artech House, 2007. 422 p. ISBN 978-1596931626.

УДК 621.382

Сравнительный анализ результатов исследования стойкости электронных компонентов к одиночному и многократному воздействию импульсом напряжения

Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
anshem@spels.ru

В данной статье представлены результаты исследования стойкости десяти типов электронных компонентов к однократному и многократному воздействию импульсом напряжения, а также сравнение методов и процедур получения этих результатов. Показано, что результаты, полученные при использовании многократного воздействия, имеют более высокую воспроизводимость показателей стойкости исследуемого типа электронного компонента, чем при воздействии однократным импульсом напряжения.

Ключевые слова: электростатический разряд; импульс напряжения; тиристорный эффект; скрытые дефекты; стойкость; надежность.

Введение

Определение стойкости и надежности электронных компонентов, разработанных для применения в автомобильной и аэрокосмической отрасли в экстремальных условиях эксплуатации (космическое излучение, высокие и низкие температуры, повышенный уровень помех и др.), невозможно без разработки методик по оценке их чувствительности к импульсным электрическим перегрузкам. Для оценки стойкости электронных компонентов в лабораторных условиях применяются высоковольтные генераторы импульсов напряжения, используемые в испытаниях на устойчивость к наносекундным [1], микросекундным импульсным помехам [2, 3], а также на воздействие электростатических импульсов [4], имитирующие воздействие наведенных импульсов напряжения на электронные компоненты с помощью стандартизированных импульсов напряжения (ИН) и электростатических разрядов. Данные ИН воспроизводят наведенные импульсные напряжения, которые возникают в результате электризации летательных аппаратов, воздействия молниевых разрядов и вызванных им электромагнитными помехами.

Зачастую в лабораторном эксперименте применяется однократное воздействие ИН на выводы электронного компонента, после которого проводится измерение параметров критериев годности (ПКГ), и при соответствии полученных значений параметров электронного компонента установленным нормам амплитуда импульса повышается и процедура «воздействие — измерение ПКГ» повторяется. В данной работе на примере пассивных компонентов — SMD-резисторов, электролитических конденсаторов и диодов общего назначения, а также «активных» компонентов — микроконтроллере, тестовых структурах статических ОЗУ, EEPROM-памяти, DC-DC-преобразователе, операционных усилителей и оптопарах, были показаны недостатки данной процедуры и представлен метод по повышению информативности, улучшению результатов при снижении трудозатрат на проведение эксперимента.

Исследовательское оборудование

Для проведения исследований применялся автоматизированный стенд, в состав которого входили генератор однократных импульсов напряжения ОИН-0503 и генератор серии импульсов напряжений СИН-001 (СИН). Оба генератора позволяют вырабатывать ИН и СИН положительной и отрицательной полярности со следующими параметрами: двухэкспоненциальная форма импульса; длительность импульса на полувысоте — 0,1, 1 и 10 мкс; передний фронт импульса — 3 нс; амплитуда воздействий — от 5 В до 6 кВ; выходной импеданс — 50 Ом; частота следования тестовых импульсов (СИН-001) — от 1 до 100 Гц.

Процедура проведения эксперимента

В данном эксперименте импульсное электрическое воздействие подавалось на выводы исследуемых электронных компонентов, начиная с малых амплитуд (5 В) и заканчивая наступлением параметрического (ПО) или функционального отказа (ФО) компонента. В существующих методах оценки показателей стойкости к однократному воздействию ИН критерием нарушения работоспособности является необратимый выход за пределы нормы значений (ПКГ) электронных компонентов. Другими словами, если значения ПКГ находятся в границах значений, указанных в технической документации на электронный компонент, то компонент считается выдержавшим воздействие и амплитуда импульса напряжения повышается с последующим воздействием. В то же время может возникнуть ситуация, когда поврежденный электронный компонент с ПКГ в пределах нормы на информативный параметр может быть засчитан как «годный» и образец подвергается дальнейшему воздействию импульсом напряжения с большей амплитудой. Поврежденный образец с ПКГ в пределах нормы имеет заниженные показатели стойкости, и полученный результат засчитывается как консервативная оценка. Использование поврежденных образцов электронных компонентов, а также образцов со скрытыми дефектами может привести к аномальному результату, когда при более коротких длительностях импульсов напряжения, подаваемых на исследуемый вывод, может наблюдаться параметрический отказ на более низких амплитудах ИН, чем при более «широких» длительностях ИН. Еще одним негативным аспектом данной процедуры является низкая воспроизводимость результатов: если на новый объект подать амплитуду импульса, на котором был обнаружен отказ у предыдущего образца, то у нового объекта этот отказ не проявится либо наступит повреждение образца, которое будет укладываться в допустимые значения ПКГ.

Также у изделий, изготовленных по КМОП-технологии, при воздействии электрического импульса может возникнуть тиристорный эффект (ТЭ) [5], во время которого значения ПКГ электронного компонента могут выйти за установленные нормы. Например, у цифровых микросхем это проявляется в повышении тока потребления и входных токов утечки ввиду повреждения внутренних элементов (рис. 1).

Для решения методических проблем, описанных выше, например таких, как низкая воспроизводимость результатов (значений амплитуд, при которых наблюдается отказ изделия) и значительный разброс полученных значений, предлагается заменить критерий нарушения работоспособности с «соответствия ПКГ нормам на параметр» на «отсутствие изменений значений ПКГ на 10%». Другими словами, если ПКГ образца изменяется относительно измеренных до начала проведения воздействия ИН по выводам образца, то процедура по определению стойкости

останавливается и образец исключается из выборки. Также в случаях оценки стойкости к однократному ИН в целях выявления области чувствительности (диапазон амплитуд ИП, в котором происходит повреждение электронных компонентов) для исследуемой цепи электронного компонента рекомендуется применить многократное воздействие одной и той же амплитуды ИН с суммарным количеством импульсов не менее 5 тысяч либо воздействием с частотой 10–100 Гц в течение одной минуты.

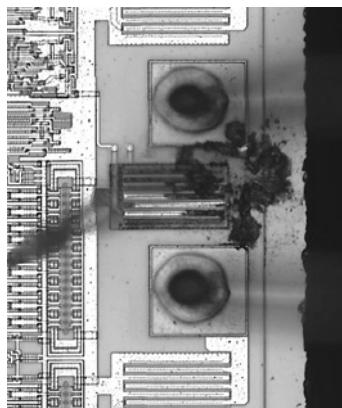


Рис. 1. Повреждение внутренней полупроводниковой структуры тестового кристалла статического оперативного запоминающего устройства при воздействии однократным ИН

На рис. 2 показаны результаты стойкости EEPROM-памяти по цепи питания при воздействии однократным ИН положительной полярности в активном электрическом режиме. Воздействие однократным ИН с амплитудами из первой области (мелкая косая черта влево) не оказывает влияния на функционирование и ПКГ EEPROM. Воздействие однократным ИН с амплитудами из второй области (крупная косая черта вправо) приводит к повреждению EEPROM с ПКГ в пределах нормы, а при повторном воздействии с той же амплитудой ИН — к катастрофическому отказу (КО). Воздействие однократным ИН с амплитудами из третьей области (вертикальные полосы) вызывают КО EEPROM, то есть ПКГ EEPROM будут находиться за пределами нормы. Схожий деградационный шаблон чувствительности образцов к ИП наблюдается и у других исследуемых типов компонентов.

При сравнении результатов стойкости, полученных при воздействии импульса с длительностью 0,1 и 1 мкс, можно увидеть пересечение желтых областей, что соответствует полученным результатам 350 В для 0,1 мкс и 400 В для 1 мкс. При повторной проверке этих значений с помощью СИН с частотой 100 Гц было подтверждено значение амплитуды плюс 350 В при длительности 0,1 мкс как минимальной амплитуды ИН, приводящей к КО образцов, однако при длительности 1 мкс отказ наступил на амплитуде 200 В. На других образцах проводилась повторная проверка амплитуды 200 В. Воздействие по цепи питания выявило, что у 5 из 50 образцов КО наступает при первом же воздействии однократным ИН. У остальных образцов наступает отказ при воздействии серией импульсов напряжения. Таким образом,

было подтверждено, что воздействие однократным ИН с амплитудой плюс 200 В может привести к КО у некоторых образцов. Следуя процедуре «многократное импульсное воздействие — измерение ПКГ», достигают повторяемости значений показателя стойкости электронных компонентов — граничных значений ИН между зеленой и желтой областью (см. рис. 2) по определенной группе выводов при заданной длительности ИН в рамках одной выборки образцов.

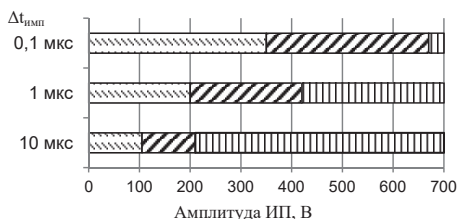


Рис. 2. Результаты стойкости EEPROM-памяти при воздействии ИН с длительностью 0,1, 1 и 10 мкс

Заключение

Результаты исследований показывают, что при воздействии однократным ИН наблюдается разброс показателей стойкости в пределах одной выборки ИН при заданной длительности ИН, что может приводить к случаям, когда показатели стойкости к однократным ИН при коротких длительностях однократных ИН могут быть ниже, чем при широких длительностях. Для исключения таких случаев предлагается использовать многократное воздействие ИН для определения чувствительности образца к заданной амплитуде воздействия и подтверждения уровня стойкости компонента, а при выявлении деградиационных процессов (изменение значений ПКГ) — выявить потенциальную ненадежность образца к воздействующей амплитуде ИН. Для ускорения подтверждения уровня стойкости вывода образца к воздействию ИН и проведения всего эксперимента рекомендуется применять тестовое воздействие с частотой до 100 Гц в течение минуты.

Литература

1. ГОСТ 30804.4.4-2013 «Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний».
2. ГОСТ ИЕС 61000-4-5-2017 «Испытание на устойчивость к выбросу напряжения. Методы испытаний и измерений».
3. ГОСТ Р 51317.4.5-99 «Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии».
4. ГОСТ 30804.4.2-2013 «Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний».
5. Шемонаев А. Н., Епифанцев К. А., Скоробогатов П. К. Тиристорный эффект в КМОП СОЗУ при воздействии одиночных импульсов напряжения // Всероссийская научно-техническая конференция «Стойкость-2021». Сборник трудов, 2021. — С. 183–184.

УДК 621.315.592

Наногетероструктурные $p-i-n$ GaAs/AlGaAs соединительные туннельные диоды для многопереходных лазерных фотопреобразователей

Толкачев И. А., Калиновский В. С., Контрош Е. В., Климко Г. В.,
Малеев Н. А., Прудченко К. К., Юферев В. С.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Включением i -слоя в активную область соединительных туннельных диодов повышена плотность мощности преобразуемого излучения многопереходными лазерными фотопреобразователями. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены $p-i-n$ туннельные диоды со значениями пиковой плотности туннельного тока ≥ 200 А/см².

Ключевые слова: многопереходный лазерный фотопреобразователь; активная область; соединительный туннельный диод; молекулярно-пучковая эпитаксия; пиковая плотность туннельного тока.

Введение

Совершенствование параметров монокристаллических многопереходных фотопреобразователей (МП ФП) [1, 2] связывают с увеличением количества фотоактивных субэлементов, соединенных между собой встречно включенными оптически прозрачными туннельными диодами (ТД). Это ведет к размытию профилей, взаимной компенсации легирующих примесей и деградации характеристик GaAs/AlGaAs соединительных туннельных диодов (ТД). Способами, позволяющими предотвратить деградацию характеристик соединительных ТД, являются снижение температуры эпитаксиального роста и включение промежуточного нелегированного i -слоя между вырожденными n^{++} - и p^{++} -слоями [3].

Эксперимент

Для апробирования моделирования, выполненного в работах [3, 4] (рис. 2а, кривая 1) с использованием метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), выращено четыре типа структур **A**, **B** (а), **C** (б), **D** (в) ТД, технологические параметры которых представлены на рис. 1.

Структуры **A**, **C** и **D** выращивались при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$, структура **B** — при 450°C . Постростовой технологией были сформированы массивы мез диодов площадью $(4-8) \cdot 10^{-4}$ см² с омическими контактами. Непосредственно на всех эпитаксиальных структурах измерения ВАХ ТД были выполнены в диапазоне напряжений от 0–0,6 В ($T = 300$ К) (рис. 1). На рис. 2 приведены усредненные ВАХ ТД (рис. 2а) с разбросом значений пикового туннельного тока J_p по пластине (рис. 2б). Средние значения J_p составляют 111 А/см² для структуры **A** (кривая 2), 131 А/см² для структуры **B** (кривая 3), 0,1 А/см² для структуры **C** (кривая 4) и $\sim 1,0$ А/см² для структуры **D** (кривая 4). Структура **A** имеет значительный разброс J_p от 90 А/см² в центре эпитаксиальной пластины и до ≥ 200 А/см² (рис. 2б) на периферии. Увеличение толщины i -слоя в структуре **B** способствовало росту среднего значения J_p в 1,2 раза по сравнению со структурой **A**. ВАХ диодов структуры **C** не имеют участка с отрицательным

дифференциальным сопротивлением, что соответствует обращенному туннельному диоду и связано со слабым уровнем вырождения n^{++} -GaAs:(δ Si)-области. В структуре **D** наблюдается типичная ВАХ ТД Esaki, что обусловлено включением слоя i -GaAs ($\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) между вырожденными областями, в результате чего J_p возрастает на порядок. Кроме того, при моделировании процесса роста последующих слоев МП ФП и отжиге в течение 2 часов при 570°C структуры **D** (рис. 2б, D anneal.) наблюдается рост J_p на 30 %.

n^{++} GaAs:(δ Si)	$1.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ 10 нм
i -GaAs	$5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ 2,5 нм (A); 5 нм (B)
i -Al _{0.2} Ga _{0.8} As	$5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ 5 нм
p^{++} Al _{0.2} Ga _{0.8} As:(δ Be)	$4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ 10 нм

a

p^+ -Al _{0.6} Ga _{0.4} As:(C), 50 нм	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
p^{++} -Al _{0.4} Ga _{0.6} As:(C), 10 нм	$1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$
n^{++} -GaAs:(δ Si), 10 нм	$\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
n^- -Al _{0.6} Ga _{0.4} As:(δ Si), 50 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

б

p^- -Al _{0.6} Ga _{0.4} As:(C), 50 нм	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
p^{++} -Al _{0.4} Ga _{0.6} As:(C), 10 нм	$1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$
i -GaAs, 7 нм	$\geq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
n^{++} -GaAs:(δ Si), 10 нм	$\geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$
n^- -Al _{0.6} Ga _{0.4} As:(δ Si), 50 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

в

Рис. 1. Схемы эпитаксиальных структур ТД: A, B – а, C – б, D – в

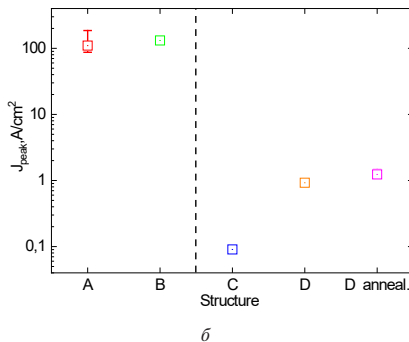
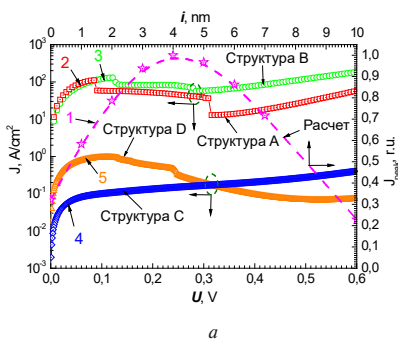


Рис. 2. Расчетная зависимость J_p от толщины i -слоя для n^{++} GaAs/ i -GaAs/ p^{++} AlGaAs-структуры — кривая 1, [3, 4]; экспериментальные ВАХ соединительных ТД: структура A — кривая 2; структура B — кривая 3; структура C — кривая 4 и структура D — кривая 5 (а). Значения пикового туннельного тока исследуемых структур ТД (б)

Заключение

Включение i -GaAs-нанослоя между вырожденными областями GaAs/AlGaAs ТД обеспечивает рост J_p на порядок. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии выращены наногетероструктуры n^{++} GaAs/ i -GaAs/ p^{++} AlGaAs туннельных диодов

со значениями пиковой плотности туннельного тока ≥ 200 А/см². При имитации процесса роста МП ФП в течение 2 часов при температуре 580 °С в эпитаксиальной структуре n^{++} -GaAs:(δ Si)/ i -GaAs/ p^{++} -Al_{0,4}Ga_{0,6}As:(C) с i -нанослоем наблюдается рост пикового туннельного тока J_p на 30 %.

Литература

1. Zaitsev D. F., Andreev V. M., Bilenko I. A. et al // Radiotekhnika, 2021. Vol. 85. P. 153–164.
2. Kalinovskii V. S., Terukov E. I., Kontrosh E. V. et al. St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2023. Vol. 16. P. 47–51.
3. Patent RF, RU2701873 C1, 2019.
4. Kalinovskii V. S., Kontrosh E. V., Klimko G. V. et al // Semiconductors, 2020. Vol. 54. P. 355–361.

УДК 621.382

Технология характеристики радиочастотного тракта контроллера систем цифровой маркировки

Ермаков А. В.^{1,2}, Сотсков Д. И.^{1,2}, Амбуркин К. М.^{1,2}, Зубаков А. В.^{1,2},
Усачёв Н. А.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

² *АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
averm@spels.ru*

Представлены результаты апробации технологии характеристики радиочастотного тракта контроллера систем цифровой маркировки (СЦМ) и разработки аппаратно-программного стенда тестирования (АПСТ), основанного на применении стандартных СВЧ-средств измерений широкой области применения.

Ключевые слова: цифровая маркировка; радиочастотный интерфейс; характеристика; ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443; ГОСТ Р ИСО/МЭК 10373-6.

Разработка и изготовление новых типов контроллеров СЦМ предполагают проведение оперативного функционального и параметрического контроля их радиочастотного интерфейса, требования к которому заданы в [1]. Методы контроля параметров радиочастотного интерфейса контроллеров СЦМ обозначены в [2]. В работе представлена технология характеристики радиочастотного тракта контроллера СЦМ, которая позволяет снизить трудоемкость, возникающую при настройке измерительной оснастки и при контроле параметров радиочастотного интерфейса стандартными методами [2]. Также преимуществом технологии является использование стандартных СВЧ-средств измерений широкой области применения без дорогостоящих, а в настоящее время и вовсе недоступных для приобретения специализированных тестеров.

Разработанная технология характеристики предполагает применение АПСТ. Структурная схема АПСТ показана на рис. 1. В состав АПСТ входят: (1) генератор сигналов произвольной формы, осуществляющий как воспроизведение сигнала несущей частоты (13,56 МГц), так и его амплитудную манипуляцию в целях формирования требуемой команды; (2) инструментальный 3-каскадный усилитель с выходной мощностью 40 дБм, коэффициентом усиления 50 дБ, коэффициентом полезного действия 37 % (при частоте 13,56 МГц); (3) векторный анализатор цепей; (4) анализатор спектра; (5) цифровой запоминающий осциллограф; (6) измерительная оснастка (ИО) и вспомогательные компоненты, выполненные в соответствии с [2]. В состав ИО входят следующие компоненты [2]: антенна терминального оборудования ближнего действия (PCD); катушка считывания *a*; катушка считывания *b*; компенсационный мост.

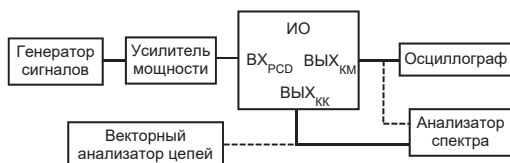


Рис. 1. Структурная схема АПСТ для контроля параметров контроллера СЦМ

Апробация АПСТ выполнена в ходе экспериментальных исследований радиочастотного интерфейса контроллера СЦМ с сигнальным интерфейсом передачи типа В. Осуществлялся контроль следующих параметров [1]: резонансная частота, амплитуда электромагнитной помехи, амплитуда нагрузочной модуляции. Контроль функционирования проводился посредством подачи команды запроса REQV и анализа целостности ответной посылки ATQV.

Авторы выражают благодарность А. Ю. Резнику (АО «Микрон») за ценные замечания, высказанные в ходе выполнения работы, и поддержку.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443-2-2014. Карты идентификационные. Карты на интегральных схемах бесконтактные. Карты ближнего действия. Часть 2. Радиочастотный энергетический и сигнальный интерфейс.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 10373-6-2015. Карты идентификационные. Методы испытаний. Часть 6. Карты ближнего действия.

УДК 621.382

Технология и средства СВЧ-характеризации базовых элементов технологических библиотек на пластине в диапазоне до 110 ГГц**Амбуркин К. М.^{1,2}, Жидков Н. М.^{1,2}, Усачев Н. А.^{1,2}**¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*² *АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
nausach@spels.ru*

Представлена технология и аппаратно-программные средства на базе зондовой станции в целях проведения характеризации базовых элементов технологических библиотек на пластине в диапазоне до 110 ГГц для задач автоматизированного восстановления параметров моделей.

Ключевые слова: приемно-передающая ЭКБ; СВЧ; характеризация; зондовые измерения.

Разработка современных изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) твердотельной СВЧ электроники (ТСВЧЭ) невозможна без использования точных и достоверных моделей базовых элементов технологических библиотек — транзисторов, диодов, индуктивностей, конденсаторов, резисторов, микрополосковых линий. Современные отечественные технологии производства ТСВЧЭ позволяют изготавливать изделия с рабочими частотами до 100 ГГц [1].

В данной работе представлена технология и аппаратно-программные средства для проведения исследований базовых элементов на пластине в целях получения данных для восстановления параметров моделей в рамках процесса характеризации. Стенд для проведения исследований построен на базе полуавтоматической зондовой станции и комплекта измерительного оборудования с диапазоном частот до 110 ГГц. Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

В ходе экспериментальных исследований в целях восстановления параметров моделей транзисторов и других активных базовых элементов проводится контроль вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик с помощью анализатора параметров полупроводниковых приборов, а также S-параметров в диапазоне частот и электрических режимов. Также в ряде случаев для транзисторов проводятся исследования шумовых характеристик (коэффициент шума, минимальный коэффициент шума, оптимальный импеданс), амплитудных характеристик (верхняя граница линейности по входу/выходу, мощность насыщения) и нелинейных параметров (X-параметры) транзисторов. Исследования пассивных компонентов (индуктивностей, конденсаторов, резисторов, микрополосковых линий), как правило, ограничиваются контролем S-параметров в диапазоне частот.

Контроль S-параметров, шумовых параметров и амплитудных характеристик осуществляется с помощью векторного анализатора цепей с соответствующими программно-аппаратными опциями. Расширение диапазона частот с 67 до 110 ГГц осуществляется использованием внешних модулей расширения частотного диапазона (РЧД) с контроллером мм-диапазона. При необходимости контроля шумовых

параметров и амплитудных характеристик в диапазоне согласования импедансов по входу и выходу транзистора применяются трансформаторы импеданса (ТИ). Конечный состав исследуемых параметров и набор электрических режимов определяются типом модели, для которой проводится экстракция параметров, и методикой экстракции.

В состав программного обеспечения, используемого для автоматизации процесса калибровки, измерений и обработки результатов, входит специализированное ПО, поставляемое производителями измерительного оборудования (Cascade WinCal, Keysight IC-CAP и д.р.), а также ПО собственной разработки.

В качестве примера использования стенда на рис. 2 представлены результаты исследования МОП-транзистора, изготовленного по отечественной технологии с проектными нормами 90 нм.

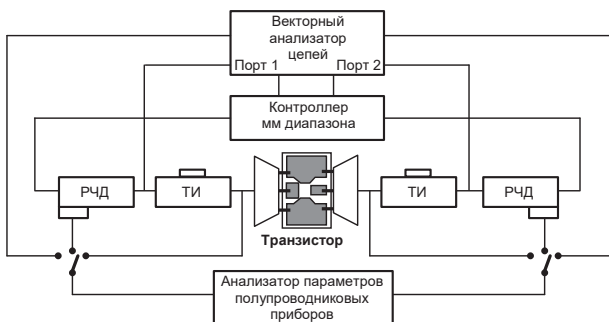


Рис. 1. Структурная схема стенда

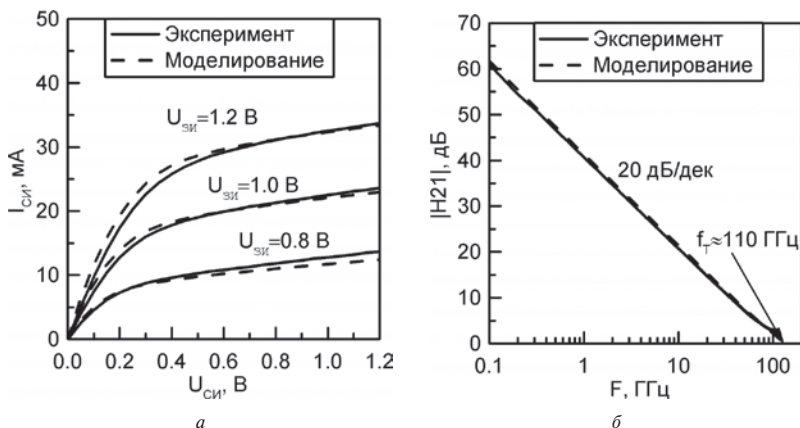


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований ВАХ (а) и частотных зависимостей коэффициента передачи (б) МОП-транзистора

Литература

1. Жидков Н. М., Сотсков Д. И., Котов В. Н., Елесин В. В. и др. СВЧ-характеристики и показатели радиационной стойкости базового элемента библиотеки отечественного технологического процесса КМОП 90 нм – МОП-транзистора // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. — КрыМиКо'2021, материалы конф., 2021. — № 3. — С. 311–312.

УДК 621.382

Особенности проектирования электрически перестраиваемых полосовых фильтров в интегральном исполнении

Дрозденко Е. С., Кульгашова А. П., Суворов А. И.

ФГУП «НПП «Гамма»

117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, 78, стр. 4

drozdenko.es@nppgamma.ru

Рассмотрены основные отличия варикапа на основе $p+n$ -перехода (НВТ) и варикапа на барьере Шоттки (рНЕМТ). На примере схемы полосового фильтра Чебышева 3-го порядка с индуктивной связью показано, что управляемый аналоговым способом СВЧ-фильтр в рамках рНЕМТ технологического процесса является одним из допустимых вариантов при реализации управляемых полосовых СВЧ-фильтров.

Ключевые слова: НВТ; НЕМТ; варикап; СВЧ-фильтр; перестраиваемый фильтр.

В современных радиоэлектронных системах широко применяются различного типа электрические фильтры. В устройствах с большим диапазоном перестройки центральной частоты, например в радиоизмерительной технике, использование переключаемых каналов с отдельными фильтрами влечет за собой значительное увеличение габаритов разрабатываемого устройства. Для снижения массогабаритных характеристик применяются перестраиваемые электрические фильтры, построенные по твердотельной технологии на GaAs-подложке, т. н. МИС СВЧ (монокристалльные интегральные схемы СВЧ). Такая технология позволяет выпускать компактные относительно недорогие микросхемы перестраиваемых фильтров.

С 2014 г. ФГУП «НПП «Гамма» ведет разработку радиоизмерительных приборов, в том числе измерительных приемников и анализаторов спектра с диапазоном частот до 50 ГГц. Ключевой особенностью данных средств измерений является высокое, порядка 80 дБ, подавление любых побочных спектральных продуктов, не являющихся измеряемым сигналом (комбинации гармоник гетеродина и исследуемого сигнала, побочные спектральные составляющие синтезаторов гетеродина и проч.). Это обстоятельство накладывает жесткие ограничения по точности совпадения полосы пропускания входных радиочастотных цепей анализатора и его полосы анализа. В приемниках иностранного производства вышеописанная задача решается путем применения сверхширокополосного ЖИГ-фильтра в составе преселектора, однако отечественным предприятиям такие технологии недоступны. Кроме того, ЖИГ-фильтры обладают значительными габаритами, массой и энергопотреблением и поэтому не подходят для применения в портативных средствах измерений.

При использовании библиотеки стандартных элементов отечественного технологического процесса рНЕМТ05 на примере схемы полосового фильтра Чебышева 3-го порядка с индуктивной связью показано, что управляемый аналоговым способом СВЧ-фильтр в рамках рНЕМТ технологического процесса является одним из допустимых вариантов при реализации управляемых полосовых СВЧ-фильтров. При этом в качестве управляющего элемента могут использоваться как рНЕМТ-варикапы, так и диоды Шоттки.

Литература

1. Дрозденко Е. С., Кульгашова А. П., Суворов А. И. Электрически перестраиваемые полосовые фильтры в интегральном исполнении // Н.-т. конф. «СВЧ-электроника-2023». Сб. тез., 2023. — С. 99–100.



УДК 621.382

Библиотека базовых элементов и функциональных блоков отечественных приемо-передающих БИС УВЧ-диапазона

Сотсков Д. И.^{1,2}, Зубаков А. В.^{1,2}, Усачев Н. А.^{1,2}, Жидков Н. М.^{1,2},
Ермаков А. В.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

² АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
disot@spels.ru

Разработан набор библиотечных СВЧ-элементов (включая усилительные и переключаемые транзисторы, конденсаторы, варикапы и др.) и функциональных блоков УВЧ-диапазона (включая маломощный усилитель, усилитель мощности, квадратурный демодулятор и др.) для стандартного отечественного «цифрового» технологического процесса КМОП 180 нм.

Ключевые слова: КМОП; базовый элемент; функциональный блок; приемо-передатчик; САПР; ультравысокая частота.

Оперативное проектирование отечественных приемо-передающих БИС систем связи, навигации, цифровой маркировки и радиочастотной идентификации, Интернета вещей и др. предполагает применение верифицированных библиотек СВЧ базовых элементов и функциональных блоков.

В настоящей работе представлены результаты проектирования специализированной СВЧ-библиотеки базовых элементов, предназначенной для использования в рамках отечественного КМОП-технологического процесса с проектной нормой 180 нм. Библиотека имеет в своем составе набор радиочастотных МОП-транзисторов для усилительного и ключевого применения, варикапы на основе МОП-структур трех типов, спиральные катушки индуктивности, МДМ-конденсаторы и прочие элементы. Библиотека предназначена для использования совместно с САПР Cadence Virtuoso IC и ориентирована на создание комплекта усилительных, генераторных и преобразовательных СВЧ сложнофункциональных блоков, а также блоков управления фазой и амплитудой сигнала приемо-передающей ЭКБ. С использованием представленной библиотеки спроектированы:

- тестовый кристалл, ориентированный на проведение исследований зондовыми методами и содержащий 13 типов базовых элементов и вспомогательные структуры для СВЧ-характеризации отечественного КМОП-технологического процесса 180 нм;
- комплект функциональных блоков приемо-передающих БИС УВЧ-диапазона: маломощный усилитель, усилитель мощности, квадратурный демодулятор, видеоусилитель, активный фильтр нижних частот с регулируемой полосой пропускания.

Направлением дальнейшей работы является изготовление и проведение экспериментальных исследований тестового кристалла, оценка точности применяемых цифровых моделей базовых элементов в диапазоне СВЧ и при необходимости их уточнение.

Литература

1. Сотсков Д. И., Бабак Л. И., Панасенко П. В. и др. Возможности и перспективы контрактной разработки и производства на российской полупроводниковой фабрике конкурентоспособной ЭКБ кремниевой СВЧ электроники для систем связи, радиолокации, радиочастотной идентификации, навигации // *Наноиндустрия*, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 253–255.
2. Елесин В. В., Сотсков Д. И., Жидков Н. М. и др. Цифровые модели в электронной промышленности: базовые элементы технологических библиотек, слож-но-функциональные блоки, изделия ЭКБ // *Наноиндустрия*, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 281–282.

УДК 621.382

Цифровые модели базовых элементов технологических библиотек: технологии восстановления параметров и верификации

Жидков Н. М.^{1,2}, Амбуркин К. М.^{1,2}, Новиков М. А.^{1,2}, Сотсков Д. И.^{1,2},
к. т. н. Усачев Н. А.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

² *АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
nmzhv@spels.ru*

Представлены инженерные методики экстракции параметров моделей СВЧ GaAs ГБТ и GaAs pHEMT, выполненных на основе ядра VBiC и EENEMT соответственно. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальных исследований GaAs ГБТ и GaAs pHEMT составляет не более 20–30 %, что делает возможным применение представленных инженерных методик (и моделей, полученных на их основе) в составе стандартных маршрутов проектирования СВЧ ЭКБ.

Ключевые слова: цифровая модель; восстановление параметров; технологический процесс; разработка; верификация.

GaAs ГБТ и GaAs pHEMT технологические процессы (ТП) широко применяются для построения ряда СВЧ-изделий — усилительных и генераторных функциональных блоков, блоков управления благодаря низкому уровню фликкер-шума (GaAs ГБТ ТП), коэффициента шума, высоким значениям удельной мощности и граничной частоты единичного усиления (GaAs pHEMT ТП). Разработка подобных изделий требует наличия моделей базовых элементов для САПР схемно-топологического проектирования. Между тем для СВЧ-транзисторов, выпускаемых отечественными предприятиями, предоставляемые модели, как правило, отсутствуют или ограничены табличными моделями на основе частотных зависимостей параметров матрицы рассеяния (S-параметры).

В настоящей работе представлены инженерные методики восстановления параметров моделей СВЧ GaAs ГБТ и GaAs pHEMT, выполненных на основе ядра VBiC и EENEMT соответственно.

В результате проведения экспериментальных исследований и восстановления параметров моделей базовых элементов (с использованием представленных методик) показано, что расхождение между результатами моделирования и экспериментальных исследований составляет не более 20–30 %, что делает возможным применение представленной инженерной методики (и моделей, полученных на ее основе) в составе стандартных маршрутов проектирования СВЧ ЭКБ.

Направлением дальнейшей работы является дополнение и/или коррекция представленной методики в части учета шумовых параметров, нелинейных и температурных эффектов, расширение диапазона рабочих токов и напряжений.

Литература

1. Жидков Н. М., Котов В. Н., Сотсков Д. И. и др. Апробация методики экстракции параметров СВЧ модели GaAs ГБТ на основе ядра VBiC // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник. Вып. 25. — Лыткарино, 2022. — С. 179–180.
2. Жидков Н. М., Амбуркин К. М., Новиков М. А. и др. Инженерная методика экстракции параметров СВЧ модели GaAs pHEMT на основе ядра EHEMT // Радиационная стойкость электронных систем. Научн.-техн. сборник. Вып. 26. — Лыткарино, 2023. — С. 189–190.
3. Amburkin K., Usachev N., Chukov G., Elesin V., Kuznetsov A. and Sotskov D. The Microwave Test and Measurement System for On-wafer Investigation under Irradiation // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 2022. P. 1–3.

УДК 621.382

Программные средства синтеза пассивных элементов технологических библиотек

Новиков М. А.^{1,2}, Жидков Н. М.^{1,2}, к. т. н. Усачев Н. А.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

² *АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
tanov@spels.ru*

Представлены программные средства синтеза ряда пассивных элементов технологических библиотек (катушки индуктивности различных форм, встречно-штыревые конденсаторы), реализованные с использованием языка программирования Python.

Ключевые слова: синтез; средство автоматизированного проектирования; индуктивность; конденсатор; технологическая библиотека.

Разработка конкурентной прямо-передающей электронной компонентной базы (ЭКБ) СВЧ-диапазона требует, помимо выполнения стандартных этапов маршрута проектирования (таких как схемно-топологическое проектирование, проведение электромагнитного анализа и др.), реализацию ряда пассивных элементов (например симметрирующих трансформаторов, индуктивностей, конденсаторов).

Как правило, реализация пассивных элементов осуществляется автоматизированными методами в целях существенного сокращения сроков проектирования ЭКБ, а также исключения ряда ошибок проектирования.

В рамках работы представлены программные средства синтеза ряда пассивных элементов технологических библиотек (катушки индуктивности различных форм, встречно-штыревые конденсаторы), реализованные с использованием языка программирования Python. Синтезируемые пассивные элементы предназначены для использования при проектировании Si, SiGe, GaAs и GaN СВЧ функциональных блоков.

Синтез топологий квадратных и октогональных катушек индуктивности, встречно-штыревого конденсатора осуществляется посредством задания диапазонов входных параметров (например, для катушек индуктивности — требуемое значение индуктивности (L), интервалы значений количества витков (N), зазоров между линиями (S), ширины линий (W)) с последующим аналитическим расчетом возможных решений (пользователь осуществляет выбор итогового решения). Результатом синтеза является сгенерированный DXF-файл, содержащий топологию требуемого пассивного элемента.

В рамках дальнейших работ планируется реализация программных средств для осуществления процедуры синтеза фильтрующих структур и согласующих цепей.

Литература

1. Sotskov D., Elesin V., Kuznetsov A., Usachev N., Zhidkov N. and Nikiforov A. A single power supply 0.1–3.5 GHz low noise amplifier design using a low cost 0.5 μm d-mode pHEMT process // *Facta universitatis — series: Electronics and Energetics*, 2020. Vol. 33. P. 317–326.
2. Mohan S.S., Hershenson M. del Mar, Boyd S.P. and Lee T.H. Simple accurate expressions for planar spiral inductances // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1999. Vol. 34. № 10. P. 1419–1424.
3. She X. Y. and Chow Y. L. Interdigital microstrip capacitor as a four-port network // *IEE Proceedings*, 1986. Vol. 133. P. 191–197.

УДК 621.396

Создание кооперации для разработки микроэлектронных программно-конфигурируемых радиосистем

Савченко Е. М., Будяков А. С., Пронин А. А.
ООО «Центр инновационных разработок ВАО»
107023, г. Москва, Семеновская пл., 1А

Представлен анализ проблемной ситуации с опытом проектирования в РФ микроэлектронных программно-конфигурируемых радиосистем и предложены варианты решения организационно-технических задач.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые радиосистемы; ПКР; Software Defined Radio; SDR; радиочастотный приемник; радиочастотный передатчик.

Программно-конфигурируемые радиосистемы (ПКР) широко используются в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) систем связи, радиолокации, радионавигации. По структуре ПКР представляет приемо-передатчик, в котором присутствует радиочастотный тракт с перестраиваемыми цифровым способом параметрами и тракт цифровой обработки сигналов с возможностью изменения алгоритмов работы в процессе эксплуатации.

На сегодняшний день есть значительный разрыв между существующими отечественными микросхемами, накопленным опытом разработки микросхем для ПКР и потребностями разработчиков РЭА, в частности радиоблоков базовых станций 4G, 5G.

В докладе приведены предложения по кооперации полупроводниковых фабрик, разработчиков аналоговых и цифровых микросхем, разработчиков РЭА в целях сокращения разрыва возможностей, потребностей и обеспечения более глубокой локализации производства РЭА на основе ПКР. Предложена концепция разработки санкционно-стойкой РЭА.

Литература

1. Collins T. F., Getz R., Di Pu, Wyglinski A. M. Software-Defined Radio for Engineers, Artech House, 2018. 378 p.
2. Савченко Е. М., Будяков А. С., Гаранович Д. И., Огурцова К. М. Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных приемо-передатчиков // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — № 1. — С. 15–20.

УДК 621.382

Особенности разработки усилителя средней мощности в диапазоне частот 90–100 ГГц**Макарец И. В.^{1,2}, Беляков В. А.¹, Фефелов А. Г.¹, Оболенский С. В.^{1,2}, Дюков Д. И.¹**¹ АО «НПП «Салют»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 7, к. 1

makartseviv@nppsalut.ru

² ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Приведены результаты разработки и экспериментального исследования балансного усилителя мощности, работающего в диапазоне частот 90–100 ГГц и выполненного на базе рНЕМТ-технологии на подложке GaAs. Достигнуто значение выходной насыщенной мощности более 100 мВт.

Ключевые слова: транзистор; усилитель мощности; рНЕМТ; GaAs; МИС.

В настоящее время большой интерес в мире представляет разработка усилителя мощности на частотах 90–100 ГГц с выходной мощностью более 100 мВт. Такие усилители нашли широкое применение в системах космической связи, радиометрии, радиолокации. Учитывая особенности работы усилителя в данном диапазоне, в АО «НПП «Салют» предварительно был создан транзистор, имеющий удельную крутизну более 500 мСм/мм, удельный ток более 600 мА/мм, граничную частоту усиления по току более 110 ГГц. Такие параметры удалось получить благодаря использованию гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs на подложке GaAs, а также Y-образному затвору, имеющему длину около 70 нм.

Аналогами усилителя являются TU-W1330305, TU-W1320301L (Arralis, Ирландия); NC11625C-9096 (METDA Semiconductor). Разработанный усилитель мощности, как и заявленные аналоги, выполнены на полевых транзисторах по схеме с двухполярным напряжением питания в виде монолитной интегральной схемы (МИС).

При проектировании МИС на частотах 90–100 ГГц вследствие малой длины волны возникает эффект нелинейного взаимодействия близкорасположенных элементов схемы. Для устранения этой проблемы в выходном каскаде используется схема деления и суммирования мощности трех транзисторов, каждый с шириной затвора 180 мкм (шесть секций по 30 мкм), и уменьшена толщина подложки до 60 мкм. Кроме того, высокая частота приводит к появлению локальной неустойчивости в усилителе из-за взаимодействия элементов схемы. По этой причине при проектировании усилителя использовалась балансная схема с применением моста Ланге [1].

На рис. 1 показаны результаты измерений коэффициента усиления изготовленного усилителя, полученные с помощью векторного анализатора цепей. Также на рисунке приведен результат расчета коэффициента усиления в среде САПР. Напряжение питания усилителя — 5 В, суммарный ток потребления МИС — 550–650 мА.

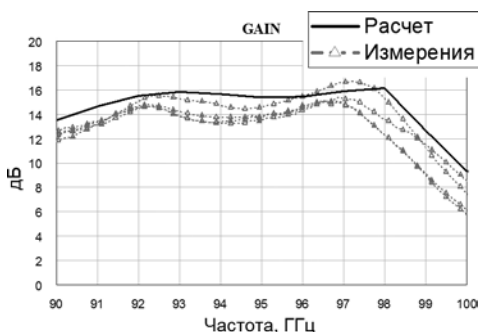


Рис. 1. Коэффициент усиления

Из рис. 1 видно, что рассчитанный и измеренный коэффициент усиления отличаются не более чем на 3 дБ в рабочем диапазоне частот. Этого удалось добиться путем уточнения модели транзистора. При моделировании использовались тестовые транзисторы с минимальными контактными площадками. Таким образом, удалось существенно уменьшить паразитную емкость и индуктивность контактных площадок.

Усилитель обладает КСВ <2,5 во всем измеряемом диапазоне за счет применения балансной схемы. В табл. 1 приведены результаты измерений выходной мощности полученного усилителя на частотах 92, 95 и 98 ГГц.

Таблица 1. Результаты измерений выходной мощности усилителя

Частота, ГГц	$P_{-1\text{дБ}}$, мВт	$P_{\text{нас}}$, мВт	K_u , дБ
92	70	120	14,5
95	50	100	13,7
98	45	90	13,5

По результатам измерений максимальное значение линейной мощности составило на частоте 92 ГГц около 120 мВт и на частоте 95 и 98 ГГц — около 100 мВт. Мощность насыщения составила 120 мВт на частоте 92 ГГц.

Таким образом, разработанный и серийно освоенный усилитель мощности не уступает по электрическим параметрам зарубежным аналогам и может применяться в радиолокационных и радиометрических системах.

Литература

1. Bessemoulin A., Rodriguez M., Tarazi J., McCulloch G., Parker A. E., Mahon S. J. Compact W-band PA MMICs in Commercially Available 0.1-um GaAs PHEMT Process // IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. October 2015.

УДК 538.955

Разработка и верификация модели магнитного туннельного перехода

Лобкова М. Д.¹, Скирдков П. Н.^{1,2}, Звездин К. А.^{1,2}¹ ООО «Новые спинтронные технологии»

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН

119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

m.shkanakina@nst.tech

Разработана модель магнитного туннельного перехода на Verilog-A, что позволяет использовать ее в системах автоматизированного проектирования и симулировать спинтронные устройства совместно с КМОП-компонентами. В основе работы модели лежит стохастическое уравнение Ландау—Лифшица—Гильберта—Слончевского, решение которого осуществляется численным методом Рунге—Кутты четвертого порядка точности. Проведена верификация работы модели в Cadence ADE.

Ключевые слова: магнитный туннельный переход; модель магнитного туннельного перехода; верификация модели.

Стремительное промышленное развитие спинтронных устройств на основе магнитных туннельных переходов (МТП) диктует необходимость создания поведенческой модели, позволяющей проектировать спинтронные устройства совместно с КМОП-компонентами. В данной работе мы представляем компактную модель магнитного туннельного перехода на языке Verilog-A, которая позволяет моделировать различные устройства, такие как TMR-сенсоры [1], MRAM (STT-MRAM) [2], наногенераторы и спин-трансферные диоды [3]. Компактная модель совместима с системами автоматизированного проектирования (САПР) и масштабируема для различных уровней технологии, что дает возможность инженерам-дизайнерам анализировать работу традиционных КМОП-схем совместно с магнитными туннельными переходами.

В основе работы компактной модели магнитного туннельного перехода лежит стохастическое уравнение Ландау—Липшица—Гильберта—Слончевского [4], которое описывает динамику намагниченности магнитного слоя в зависимости от внешнего магнитного поля, анизотропии, магнитостатического поля, вращающего момента и тепловых флуктуаций. Свойства динамики намагниченности МТП преобразовываются в электрические характеристики с использованием модуля туннельного магнитосопротивления (ТМС). Верификация модели осуществлялась в САПР Cadence Virtuoso.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00432-П)

Литература

1. Lenz J., Edelstein A // IEEE Sens. J., 6, 2006, 631–649.
2. Kiselev S. I., Sankey J., Krivorotov I., Emlay N. et al // Nature, 425, 2003, 380.
3. Tulapurkar A., Suzuki Y., Fukushima A., Kubota H. et al // Nature, 438, 2005 339.
4. Slonczewski J. C., Magn J // Magn. Mater., 159, 1996, L1.

УДК 621.3.049

Интерпретация алгоритмов быстрых косинусных преобразований для энергоэффективных ассоциированных алгебраических структур на основе ПЛИС

Турбин Д. С.^{1,2}, к. т. н. Краснюк А. А.^{2,3}

¹ АО «ЭНПО СПЭЛС»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31
dstur@spels.ru

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»
aakr@cs.niisi.ras.ru

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru

Проведен анализ алгоритма дискретного косинусного преобразования и рассмотрена возможность его оптимизации для рядов четной длины с учетом свойств косинуса для алгебры Галуа. Обсуждается возможность аппаратной интерпретации применения алгоритма на основе системы остаточных классов с использованием ПЛИС.

Ключевые слова: преобразование Фурье; дискретное косинусное преобразование; алгебра Галуа; система остаточных классов.

Введение

Одним из основных ограничений энергоэффективности алгоритмов распознавания образов для нейросистем и систем искусственного интеллекта, цифровой фильтрации изображений и извлечения признаков, расчета траекторий и маршрута движения автономного транспорта является высокая вычислительная сложность дискретных ортогональных преобразований, в частности дискретного косинусного преобразования (ДКП) и одномерного преобразования Хартли [1]. Широкое применение косинусных преобразований для указанных целей обусловлено их уникальными возможностями по обработке данных, описываемых функциями преобразования Карунена—Лозва [2], позволяющими минимизировать число спектральных компонент с заданной точностью, а также возможностью использования блочной структуры ассоциированных аппаратных решений, причем «четное периодическое» представление данных позволяет уменьшить энергозатраты для задач компрессии изображений класса JPEG и MPEG в нейросетевых системах распознавания образов.

Свойства алгоритма дискретного косинусного преобразования

Основная вычислительная нагрузка при выполнении ортогональных косинусных преобразований размерностью N связана с преобразованием следующего вида:

$$f(m) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(x(n) \cos \frac{\left(n + \frac{1}{2} \right) \pi m}{N} \right), \quad m = (0, \dots, N-1). \quad (1)$$

Быстрое преобразование на основе алгоритма дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с разделенным основанием длины $N = 16$ требует как минимум 34 операций умножения и 56 операций сложения [3]. Помимо этого, перед началом каждой новой итерации алгоритма требуются дополнительные операции, связанные с перекомпоновкой, что усложняет аппаратную реализацию алгоритма. Альтернативным методом аппаратной реализации алгоритма ДКП, связанного с ДПФ, является применение ПЛИС.

Был рассмотрен основной алгоритм ДКП для коротких длин $N \leq 16$ в случае интерпретации умножения преобразованного вектора на матрицу ДКП в виде поэлементного алгебраического умножения. Аппаратное решение для подобных операций не требует преобразований входных и выходных данных между алгебраической и позиционной системами счисления. Рассмотрен ряд ДКП длины $N = 8$. В силу свойств косинуса для данной интерпретации выполняются следующие равенства значений позиций ряда n : $\{1 = 15 = -7 = -9; 2 = 14 = -6 = -8; 3 = 13 = -5 = -11; 4 = 12; 0 = -8\}$. Соответственно, для вычисления матричного представления ДКП размерностью 8×8 необходимо вычислить три значения косинусов, что показано на рис. 1 ($x = \pi/16, y = 2\pi/16, z = 3\pi/16$).

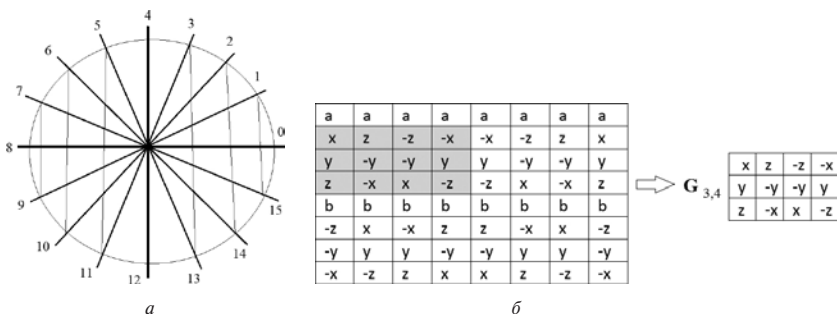


Рис. 1. Интерпретация ДКП размерностью $N = 8$ и упрощение матрицы преобразования

Апробация результатов

Использование алгебры Галуа по основанию $2N$ и умножение в остаточных классах позволяют реализовать алгоритм ДКП на основе LUT (Lookup Table) архитектуры ПЛИС. Соответственно, для $N = 8$ применение ПЛИС позволило уменьшить энергопотребление до восьми раз при сохранении производительности вычислений ДКП в модулях FFT лабораторных нейросетевых имплементаций.

Заключение

Современные нейросетевые технологии, в частности для LP- и ULP-приложений, во многом ограничиваются мощностными затратами на выполнение операций умножения для ортогональных преобразований. Оптимизировать данные вычисления и снизить энергопотребление для этого класса задач позволяет интерпретация ДКП блочной структурой с переводом вычислений в пространство Галуа по основанию $2N$. Результат умножения такой матрицы на входной вектор сводится к NAND-операциям в таблице значений, задаваемых разработчиком.

Представляет интерес имплементация результатов исследований на технологии потоковых вычислений модулей FFT для энергоэффективных графических процессоров и модулей.

*Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0008*

Литература

1. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
2. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Советское радио, 1979. — 312 с.
3. Чичева М. А. Быстрые алгоритмы дискретного косинусного преобразования // Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. Н. Королева, 2010. — 55 с.

УДК 621.3.049

Критерии цифровой гигиены для реализации некоторых концепций корпоративных технологий PLM

К. т. н. Петров К. А.¹, Корнеева Е. В.¹, к. т. н. Краснюк А. А.^{1,2}¹ ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»

petrovk@cs.niisi.ras.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

aakrasnyuk@mephi.ru

Приводятся результаты анализа современного состояния научных исследований в области обеспечения цифровой безопасности для процессов проектирования ЭКБ. Рассматривается ряд правил выполнения проектов, обеспечивающих защиту данных от несанкционированного копирования и использования, а также от возможной дискредитации результатов на коммерческих рынках, которые и определяются как правила цифровой гигиены.

Ключевые слова: PLM; Malicious Hardware; Design Obfuscation.

Введение

Ведущие мировые компании, в частности Dassault Systems, Siemens Digital, Autodesk, PTC, Boeing Integrated Defense Systems и др., уделяют существенное внимание разработке корпоративных технологий PLM, включая ряд правил проектирования и управления, обеспечивающих не только цифровую безопасность, но и защиту информации от возможной дискредитации на коммерческих рынках и конкурсах проектов. Это связано с тем, что, как правило, функциональный и институциональный состав проектов современных ЭКБ и систем на их основе носит множественный характер организаций-исполнителей. Из-за аутсорсинга в процессе изготовления интегральных схем (ИС) появляются проблемы, связанные с внедрением аппаратных закладок, подделок ИС, пиратством и несанкционированным перепроизводством. Особую значимость имеют практики и технологии оценки рисков, связанные с оценками конкретных ситуаций и проблем окружения (например санкционных рисков и угроз), а также алгоритмы упорядочивания различных культур и практик соисполнителей, контрагентов и поставщиков, оценки задач по мультипроектированию, в частности использованию САПР различных производителей, АРМ под конкретные сетевые технологии и пр.

Авторы рассматривают возможный подход к практикам обфускации результатов проектов на примере технологий Design Obfuscation и Logic Obfuscation, применяемых, например, в решениях для криптокошельков [1]. Соответственно, предлагается разделение на классы рисков, визуализации и вероятностные оценки рисков (РЕА), которые позволяют минимизировать количество возможных инцидентов в ИБ проектов.

Система управления проектами

Как правило, современные проекты разработки ЭКБ носят многоступенчатый и мультипользовательский характер: каждая из ступеней включает ряд проектных групп, команд, свои методы стимулирования и формы исполнительской культуры

для задач проектирования. Также индивидуальными являются оценки и формы логистики и собственно инфраструктуры проектов, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Общая структура многопрофильной системы реализации проектов [2]

Каждая из ступеней, каждая составляющая является объектом возможных атак и цифровых инцидентов. Соответственно, рассматривается ряд правил, позволяющих классифицировать и актуализировать методы защиты данных в проектах на основных этапах его реализации. Достаточно новым и оригинальным подходом является метод обфускации проектов, который позволяет использовать дополнительные элементы в структуре этапов проекта, скрывающие ее основные функциональные и институциональные возможности. Иначе говоря, обфускация проектов — это необходимый на нынешнем этапе технологий PLM способ сокрытия данных в проектах для неавторизованных лиц. Обфускация меняет структуру и конфигурацию проектов разработки ИС таким образом, что их правильная конечная реализация возможна только в том случае, если по аналогии с цифровой ИС управляющие сигналы на дополнительных ключевых входах устройства принимают правильные значения [3].

Апробация результатов

При разработке технологии корпоративной PLM учитывался опыт Linux Foundation's Core Infrastructure Initiative (CII) и Гарвардской лаборатории инноваций (Laboratory for Innovation Science at Harvard, LISH), которые в начале 2020 года выпустили переработанную версию САПР с открытым выпуском (Census II of Open Source Software), в которой применяется технология гигиены включения компонентов проекта в свой код и их последующее использование (Supply Chain

Hygiene). Основные принципы данного подхода к цифровой гигиене проектов разработки ЭКБ следующие:

- использование минимально возможного разнообразия компонентов;
- использование только высококачественных компонентов, что означает отказ в крупных проектах от новых компонентов в пользу стабильных, даже если последние сильно уступают по функционалу;
- постоянный контроль и предоставление всей необходимой информации по использованным компонентам.

Проведенные вероятностные оценки рисков (РЕА) на примерах использования открытого ПО для проектирования ИС показали ряд возможных недостатков технологий *equirisk contour methods* [2], связанных именно с многопользовательским характером проектов, требующих существенных организационных и временных затрат по каждому исполнителю. Тем не менее обеспечение цифровой гигиены по каждому исполнителю проекта является необходимым условием реализации современных PLM-технологий.

Заключение

Современные технологии PLM (Product Lifecycle Management) уже не рассматриваются как некоторое расширение функционала алгоритмов управления проектами. Важным и необходимым условием является обеспечение концепций цифровой гигиены, минимизирующих как инциденты в защите данных проектов, так и факторы возможной дискредитации проектов для коммерческого и заказного проектирования. Достаточно новым и необходимым условием реализации современных корпоративных технологий PLM является разработка методов обфускации проектов в целях сокрытия данных в проектах для неавторизованных пользователей.

**Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0004**

Литература

1. Власов А. И., Карпунин А. А., Новиков И. П. Системный анализ технологии обмена и хранения данных blockchain // Иркутский государственный университет путей сообщения. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017. — № 3 (55). — С. 75–83.
2. Karl Werner Wagner, Gerold Patzak. Prozesse analysieren und konzipieren // Performance Excellence — Der Praxisleitfaden zum effektiven Prozessmanagement, 2020. P. 95–172.
3. Красов А. В., Зуев И. П., Карельский П. В., Радынская В. Е., Гераськина В. С. Алгоритмы и методы защиты программного кода на базе обфускации. *i-methods* // Информатика, вычислительная техника и управление, 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 1–12.



УДК 621.382

Автоматизация поиска оптимальных входных параметров при проектировании СБИС

Желудков Н. В., Кочева Е. С., Евлампиев Б. Е., Ткаченко Е. В.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

nvgl@cs.niisi.ras.ru

В работе представлен метод численной оценки спроектированной СБИС, отражающей ее основные характеристики. Предложен автоматизированный алгоритм поиска оптимальных входных параметров при проектировании СБИС с помощью фреймворка Optuna.

Ключевые слова: топологическое проектирование СБИС; Optuna; оценка выходных метрик; алгоритм поиска экстремумов функций.

Введение

В процессе топологического проектирования СБИС с помощью САПР требуется задать множество входных параметров и начальных характеристик проектируемой схемы. К таким входным параметрам можно отнести период тактового сигнала, начальную плотность заполнения ячеек, размеры и соотношение сторон блока, ограничения на максимальные фронты сигналов, параметры сетки земли — питания, доступное число слоев металлизации для разводки и т.д. Существует актуальная задача нахождения такого набора входных параметров, который позволит получить схему с наилучшими выходными характеристиками — большей частотой работы, меньшей занимаемой площадью и меньшим энергопотреблением. Сложность задачи заключается в большом числе комбинаций входных параметров, влияющих на финальный результат, и неравномерности влияния на результат различных параметров. Прикладной задачей для решения проблемы, описанной выше, является определение численной оценки спроектированной СБИС на основе выходных метрик.

Оценка выходных характеристик схемы

Для решения задачи нахождения оптимальных входных параметров требуется дать численную оценку спроектированной схемы. Оценка проводится на основе выходных метрик, которые можно получить в САПР. На их основе представлена Score-функция (S):

$$S = \alpha \text{sigm}(\text{clk}_n) + \beta \text{sigm}(\text{pwr}_n) + \gamma \text{sigm}(\text{area}_n) + \eta \text{sigm}(\text{DRC}_n),$$

где α , β , γ и η — коэффициенты влияния периода, потребляемой мощности, площади и числа DRC-нарушений; sigm — сигмоидальная функция; clk_n , pwr_n , area_n и DRC_n — нормированные значения выходных метрик. Получившееся значение функции Score характеризует «качество» спроектированной схемы: меньшему значению функции соответствует схема с лучшими характеристиками. Введение данной функции позволяет сравнивать различные варианты схемы.

Алгоритм поиска оптимальных входных параметров

На рис. 1 представлен алгоритм поиска на основе САПР для топологического проектирования Innovus.

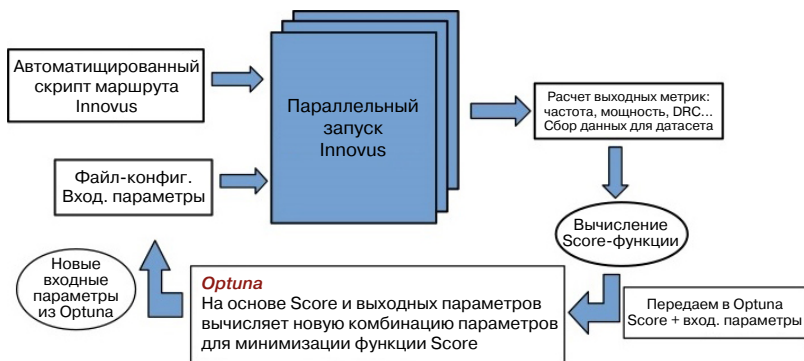


Рис. 1. Автоматизированный маршрут работы Optuna

Score-функция является функцией входных параметров, влияющих на результат проектирования. Зная вид этой функции, можно определять, какие выходные метрики будет иметь схема при определенном наборе входных параметров. Сложность заключается в том, что вид этой функции изначально неизвестен и может меняться от одного блока к другому [1]. Задачу поиска оптимальных входных параметров можно свести к поиску минимума Score-функции. Для нахождения минимума функции неизвестного вида предлагается использовать фреймворк Optuna, который применяют в задачах автоматизированного поиска гиперпараметров в машинном обучении [2].

Заключение

Алгоритм поиска оптимальных входных параметров с использованием Optuna на основе оценки качества схемы с помощью Score-функции позволяет в среднем увеличить частоту работы схемы на 6%, уменьшить площадь на 29%, значительно сократить число DRC-нарушений относительно результатов, полученных инженером, на эксперименте с двумя схемами, спроектированными по технологическим нормам 65 нм.

Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0008

Литература

1. Jinwook Jung., Kahng Andrew B. METRICS2.1 and Flow Tuning in the IEEE CEDA Robust Design Flow and OpenROAD // 2021 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), 2021.
2. Takuya Akiba, Shotaro Sano, Toshihiko Yanase, Takeru Ohta, Masanori Koyama. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // The 25th ACM SIGKDD International Conference, 2019. P. 2623–2631.

УДК 621.3

Косимуляция СнК высокопроизводительного микропроцессора на ПЛИС и на RTL-симуляторе через интерфейс PCIe

Ворсин А. Г., Петров К. А., Зубковский П. С.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

vorsin@cs.niisi.ras.ru, petrovk@cs.niisi.ras.ru, zubkovsky@cs.niisi.ras.ru

Верификация систем на кристалле методом косимуляции позволяет сочетать сильные стороны различных методов моделирования. В работе описано объединение моделей на ПЛИС и в RTL-симуляторе. Разработаны программная и аппаратная части, производящие обмен данными между двумя разными моделями через интерфейс PCIe. Выполнен расчет полученного ускорения.

Ключевые слова: верификация; косимуляция; СнК; ПЛИС; PCIe.

После первичной проверки отдельных компонент системы на кристалле бареметальными тестами и с помощью окружения, выполненного на языке описания аппаратуры, требуются более сложные сценарии в виде загрузки операционной системы и отладки взаимодействия драйверов с аппаратной частью. Моделирование таких процессов на RTL-симуляторе заняло бы неоправданно много времени порядка нескольких недель [1].

Данная проблема приводит к использованию различных аппаратных ускорителей моделирования, одним из которых являются программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС). Сейчас данные устройства имеют достаточное количество элементов конфигурационной логики для размещения полноценной системы на кристалле. Прототипирование в процессе верификации необходимо, так как сокращает время моделирования в сотни раз [2]. Также наличие различных низко- и высокоскоростных интерфейсов, которыми зачастую снабжают печатные платы с ПЛИС, позволяет отлаживать контроллеры этих интерфейсов.

Обратной стороной использования прототипов на ПЛИС является ограниченный объем диагностической информации. В то время как размер дампа моделирования в RTL-симуляторе ограничен объемом ПЗУ рабочей машины и может достигать десятков гигабайт, при хранении сигналов для отладки на ПЛИС используются блоки ее накристалльной памяти, которые также занимает прототип СнК. Общий объем накристалльной памяти одной ПЛИС при этом редко превышает десятки мегабайт. Подробность диагностики снижается в том числе и из-за того, что система захвата сигналов для диаграмм требует наличия одной опорной частоты, что делает невозможным анализ сигналов из нескольких тактовых доменов за раз.

В качестве компенсации минусов прототипирования был предложен способ гибридного моделирования, где основная часть СнК размещается на ПЛИС для получения максимального ускорения, а отлаживаемая часть существует в виде модели в RTL-симуляторе для возможности максимально подробной диагностики [1]. При этом ПЛИС соединяется с вычислительной машиной, на которой запущен симулятор посредством интерфейса PCIe. Логическую связь между частями модели осуществляет разработанная аппаратно-программная надстройка.

Похожие решения существуют у крупных компаний — производителей аппаратуры и программного обеспечения для верификации [3], однако там используются проприетарные шины для стыковки косимулируемых объектов.

Таким образом, при использовании косимуляции на ПЛИС с RTL-симулятором получается совместить преимущества обоих методов, пожертвовав скоростью моделирования по сравнению с чистым прототипированием.

*Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0004*

Литература

1. Rafal Kulaga, Marek Gorgon. FPGA implementation of decision trees and tree ensembles for character recognition in Vivado HLS // Image Processing & Communication. Vol. 19. № 2–3.
2. Юрлин С. В., Бычков И. Н. Прототипирование на основе ПЛИС для верификации многоядерных микропроцессоров, проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем (МЭС) — 2014.
3. Clément Foucher, Alexandre Nketsa. A Dynamic FPGA-based Hardware-in-the-Loop Co-simulation and Prototype Testing Platform // ICONS 2015, IARIA, Apr. 2015, Barcelona, Spain.
4. Salahuddin Savugathali, Muslim Mustapa, Fazrul Faiz Zakaria. Manual clock distribution technique in partitioning stage for multi-FPGA prototyping // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol. 14. № 2. May 2019.

УДК 621.317

Исследования лазерным термоволновым методом тепловых свойств контактов полупроводник — керамика, спаянных пастами различных составов

Прудченко К. К., Глазов А. Л., Калиновский В. С., Контрош Е. В.,
Муратиков К. Л.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
Vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Показана эффективность лазерной термоволновой диагностики теплопроводящих свойств паяных соединений в современных микроэлектронных приборах. Проведена оценка локальных теплопроводностей и тепловых сопротивлений спаев. Выявлено отклонение их локальных значений от средних по слою и справочных данных.

Ключевые слова: паяные контакты; теплопроводность; гетероструктуры; температурные волны; лазеры; микроскопия.

Введение

Для обеспечения надежной работы современных микроэлектронных приборов необходимы паяные соединения, которые обеспечивают эффективный отток тепла от активной области прибора к теплоприемнику. Традиционно для пайки использовались свинцовосодержащие припои. В последнее время по экологическим соображениям активно внедряются бессвинцовые припои двух- и трехкомпонентного состава [1]. Обычно для припоев указываются только усредненные значения теплопроводности, полученные для объемных образцов. Локальные тепловые свойства могут значительно отличаться. Основная цель данной работы состояла в изучении возможностей лазерных термоволновых (ЛТВ) методов для определения локальных тепловых свойств паяных контактов, выполненных с помощью паст различного состава и в различных режимах, и их соответствия справочным значениям.

Методика ЛТВ-измерений и полученные результаты

В работе исследовались тепловые характеристики паяных контактов гетероструктур InGaP/GaAs/Ge с теплопроводящей керамикой AlN в условиях, не приводящих к деградации гетероструктуры. Пайка осуществлялась между Ge-подложкой и керамикой с предварительной подготовкой их поверхностей и нанесением слоев рекомендуемых металлов. В качестве припоев использовались активные паяльные пасты — как свинцовосодержащие, так и бессвинцовые на основе сплавов BiSn(42), InSn(48) и SnAg(3)Cu(0,5). Для исследования использовались торцевые поверхности, перпендикулярные слоям структуры.

Тепловые волны в исследуемой области образца возбуждались сфокусированным лазерным излучением 532 нм, модулированным с частотой 1 кГц. Возбуждаемые в структуре тепловые волны детектировались по отклонению пробного луча He-Ne-лазера, проходящего в воздушной среде над нагреваемым участком поверхности. Образец сканировался по двум координатам вдоль поверхности разреза для формирования ЛТВ-изображений. При наличии теплового сопротивления в определенной области образца температура над поверхностью локально повышается,

приводя к увеличению отклонения зондирующего лазерного луча. Моделирование теплопереноса в многослойной структуре позволяло количественно оценить локальные теплофизические параметры ее отдельных слоев [2].

На рис. 1 приведено ЛТВ-изображение поверхности разреза одной из структур со спаем из BiSn(42) и его усредненное сечение поперек границ слоев.

Полученные экспериментальные результаты позволили оценить теплофизические параметры паяных соединений с пространственным разрешением около 10 мкм. ЛТВ-микроскопия выявила неоднородность тепловых характеристик паяного слоя. Рентгеновский спектральный анализ показал, что обнаруженный эффект связан с локальным изменением химического состава [3]. В результате эффективное значение теплопроводности паяного слоя может заметно отличаться от указанного производителем.

Заключение

ЛТВ-методы позволяют эффективно диагностировать теплофизические параметры паяных слоев полупроводниковых гетероструктур с теплопроводящей керамикой и контролировать оптимальные условия их исполнения. Продемонстрировано, что они имеют неоднородную структуру, а их теплофизические параметры могут заметно отличаться от значений, указываемых производителем.

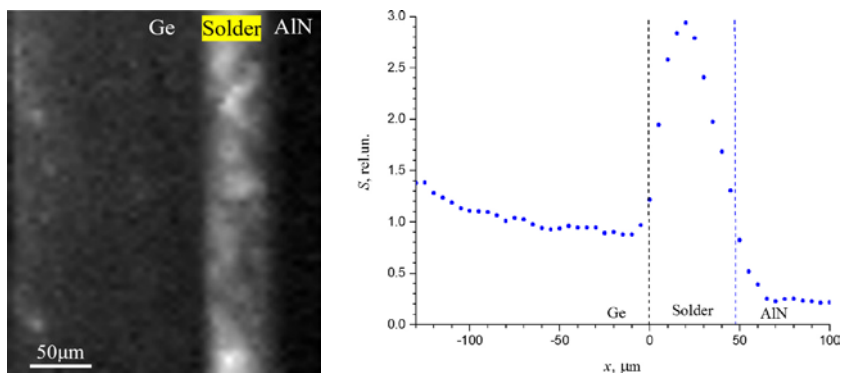


Рис. 1. ЛТВ-изображение части среза структуры СЭ — спай BiSn(42) — керамика и усредненное сечение поперек границ слоев

Литература

1. Hu F. Q., Zhang Q. K., Jiang J. J., Song Z. L. Influences of Ag addition to Sn-58Bi solder on SnBi/Cu interfacial reaction // Mater. Lett., 2018. Vol. 214. P. 142–145.
2. Glazov A. L., Kalinovskii V. S., Muratikov K. L. Heat transfer through soldered and bonded joints of multilayer semiconductor devices studied by laser photothermal beam-deflection method // Int. J. Heat Mass Transf., 2018. Vol. 120. P. 870–878.
3. Glazov A. L., Kalinovskii V. S., Nashchekin A. V., Muratikov K. L. Influence of micro-composition of solder alloy on the distribution of local thermal conductivities in semiconductor-ceramic solder joints investigated by laser thermal wave and X-ray spectral methods // J. Alloy. Comp., 2019. Vol. 800. P. 23–28.

УДК 53.088

Проективная модель измерений. Проективные АЦП

Цыбульский О. А., к. т. н., доцент

Димитровградский инженерно-технологический институт —
филиал НИЯУ МИФИ

433511, Ульяновская область, г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294
multimer@list.ru

Доклад посвящен развитию теории измерений в областях, в которых применение линейной модели измерений становится неэффективным. Это параметрические и широкодиапазонные измерения, в которых нелинейность характеристики преобразования уже необходимо учитывать в модели измерения. Эту задачу решает проективная теория измерений и проективные АЦП. Обобщенное уравнение проективного измерения включает линейное и параметрическое преобразования в качестве частных случаев.

Ключевые слова: модель измерения; уравнение измерения; проективное преобразование; АЦП.

Применяемое в теории измерений уравнение измерения является линейной функцией преобразования. Однако существует класс параметрических преобразователей, например измерительные мосты, в которых функция преобразования дробно-линейная.

В математике дробно-линейное преобразование изучается проективной геометрией и является проективным преобразованием. Поскольку понятие «проективный» более общее и емкое, чем понятия «дробно-линейный» и «параметрический», далее будем предпочтительно применять к этим преобразованиям термин «проективные» преобразования, не исключая применение терминов «дробно-линейный» и «параметрический», если это необходимо.

Обобщенное уравнение проективного измерения, объединяющее линейное и дробно-линейные уравнения, имеет вид

$$\bar{X} = (1 + n\bar{X})\bar{K},$$

где $n = \{-1, 0, 1\}$, $\bar{X} = \frac{b}{X_m}X$, $\bar{K} = \frac{b}{a}K$ — нормированные параметры преобразования, a, b — постоянные коэффициенты. X_m — величина, воспроизводимая мерой.

На рис. 1 приведены функции преобразования при проективном измерении для различных значений $n = \{-1, 0, 1\}$. Функция преобразования является равно-сторонней гиперболой с центром проекции в точке $S(-1, 1)$ при $n = 1$ и центром в точке $S(1, -1)$ при $n = -1$. При $n = 0$ функция линейна, центр проекции находится в бесконечности.

Обобщенное уравнение проективного измерения описывает все проективные и линейные преобразования, характеристика которых расположена в I-квadrante. Оно позволяет заменить все множество этих преобразований проецированием только из четырех фиксированных центров проекции: $(-1, 1)$, $(-\infty, \infty)$, $(\infty, -\infty)$, $(1, -1)$.

Получен инвариант, который не изменяется при проективном измерении:

$$\frac{\delta\bar{X}}{\bar{X}} = \frac{\delta\bar{K}}{\bar{K}}.$$

Рассмотрены структурные схемы проективных АЦП. Преимущества проективных АЦП в сравнении с линейными АЦП рассматривались на форуме «Микроэлектроника-2017» [1]. Например, одним и тем же 12-разрядным АЦП, задавая различные значения n , можно получить три разных полосы предельной погрешности δX , приведенные на рис. 2. Для получения того же динамического диапазона 1:1001 при линейном уравнении измерения потребуется применение 16-разрядного линейного АЦП.

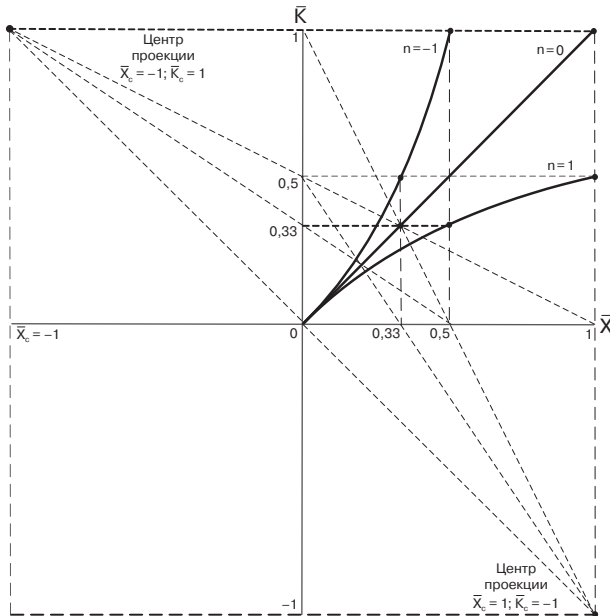


Рис. 1. Три типа измерительного преобразования, построенного на основе линейных преобразователей при значениях $n = \{-1, 0, 1\}$

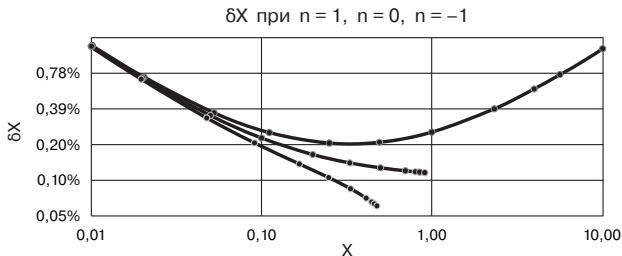


Рис. 2. Графики предельной относительной погрешности измерения 12-разрядным АЦП при различных значениях $n = \{1, 0, -1\}$

Предложены варианты автоматической коррекции погрешности, позволяющие скорректировать аддитивную, мультипликативную и гиперболическую (нелинейную) составляющие предельной погрешности проективного АЦП. Варианты используют три, два либо одно тестовое измерение.

Более подробно рассмотренные вопросы проективных измерений изложены в монографии [2].

Литература

1. Цыбульский О.А. Сравнение характеристик линейного и дробно-линейного (проективного) аналого-цифровых преобразований // Международный форум «Микроэлектроника-2017». Сборник докладов. Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017. — НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск S(82). — М.: ТЕХНО-СФЕРА, 2018. — С. 344–350.
2. Цыбульский О.А. Основы проективной теории измерений: монография. — Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. — 156 с. — ISBN 978-5-6045061-3-4.

УДК 519.722:519.246.2

Варианты проверки энергоэффективных генераторов случайных чисел для встроенных систем

Лысенко Е. В., Лагутенко Д. В., Панин А. Д.*ООО «НМ-Тех»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,**этаж 1, помещение XII, офис 4,4а**info@nm-tech.org*

Рассмотрены национальные и международные стандарты оценки датчиков случайных чисел. Предложены способы оценки датчиков случайных чисел, имеющих в своем составе физический источник шума, с малыми линейными размерами и низким энергопотреблением.

Ключевые слова: датчик случайных чисел; цепи Маркова; информационная энтропия Шеннона; распределение Вейбулла.

Современная практика создания миниатюрных электронных устройств идентификации и аутентификации, таких как смарт-карты, сим-карты, системы на кристалле или личные идентификаторы пользователей, требует создания генераторов случайных чисел (ГСЧ), обладающих малыми линейными размерами, низким энергопотреблением и высокой скоростью работы [1]

На сегодняшний день все датчики случайных чисел должны соответствовать требованиям международного стандарта AIS31 (AIS 20) [2] и российскому стандарту «Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации».

Параметры шумовых сигналов в интегральных микросхемах (ИМС) определяются, с одной стороны, физической природой процессов, протекающих в единичных приборах, а с другой стороны, конструктивно-технологическим исполнением самого единичного прибора — источника шума.

Наиболее популярным решением, применяемым в системах на кристалле или личных идентификаторах, являются датчики на основе шумящего диода [3]. Но из-за своих физических размеров данное решение не может быть применимо в составе сим-карт и смарт-карт. Для данного типа устройств применяются датчики случайных чисел, основанные на кольцевых генераторах, хаотических осцилляторах, диодах, сдвиговых регистрах и т. д.

На сегодняшний момент методика оценки таких датчиков изучена недостаточно. Для оценки свойств датчика на основе шумящего диода в основном используется распределение Вейбулла. Для оценки свойств датчиков, основанных на других схемотехнических решениях, используются методики, описанные в AIS31 (AIS 20), или методики, основанные на свойствах цепи Маркова [4].

В ходе данной работы авторами предложен метод оценки датчиков случайных чисел, обладающих малыми размерами и являющихся энергоэффективными устройствами, основанными на свойствах цепи Маркова.

Литература

1. Зиновьев Д. В., Лебедев А. В., Никитин А. П. О некоторых аспектах проектирования и практической реализации генераторов случайных чисел низкого энергопотребления // Тезисы 10-го межведомственного научно-практического семинара «Системы и средства защиты информации», 2018.
2. Turan M. S., Barker E., Kelsey J., McKay K. A., Baish M. L., Boyle M. Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation // NIST Special Publication 800-90B, 2018. 84 p.
3. Виноградов А. С., Сычев А. Н. Диодный генератор шума для радиометрической системы. — Москва. — 4 с.
4. Бутковский О. А. Предельные теоремы марковских процессов / Автореферат. — М., 2013. — 19 с.

УДК 004.056.53

Применение методов виртуализации для обеспечения доверенности и информационной безопасности устройств встраиваемых систем

Храмов С. О., Жариков А. М., Клоков В. А.*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
sokhramov@mephi.ru*

Рассмотрена возможность применения инструментов виртуализации в автономных встраиваемых системах на базе процессоров архитектуры ARM для повышения уровня доверенности устройств и изоляции потенциально опасного программного обеспечения от основной операционной системы.

Ключевые слова: виртуализация; доверенность; информационная безопасность; встроенные системы; ARM-процессоры.

Введение

Обеспечение информационной безопасности и доверенности устройств является необходимым требованием при разработке программного обеспечения встраиваемых систем. Использование виртуализации для этих целей позволяет изолировать потенциально опасное программное обеспечение и, как результат, получить более защищенное с точки зрения информационной безопасности устройство. Активное применение процессоров архитектуры ARM при создании встраиваемых систем и наличие технологии ARM TrustZone от компании — разработчика ARM позволяют использовать аппаратно-оптимизированную виртуализацию.

Уровень защищенности встраиваемых систем

Технология ARM TrustZone, доступная для процессоров семейства ARMv7-A и выше, позволяет использовать secure-режим работы процессора [1]. Данный режим работы проверяет подписи загрузчиков и ядер, организует обмен данными только между доверенными компонентами, ограничивая взаимодействие с критически важной информацией неподтвержденными элементами системы. В свою очередь, обработка информации, поступающей с недоверенных устройств, происходит в non-secure-режиме, который никак не может повлиять на secure-режим.

На базе ARM TrustZone может быть реализована паравиртуализация [1] одного из трех типов: одна виртуальная среда, две виртуальные среды и множественные виртуальные среды [2]. Чаще всего используется второй тип, при котором secure-и non-secure-режимы используются как виртуальные машины с ОСРВ и ОС общего назначения соответственно; гипервизор работает из secure-режима. Данный метод является аппаратно-оптимизированным, поскольку разделение на доверенную и недоверенную среды закладывается на этапе производства чипов.

Для применения полной виртуализации в процессорах архитектуры ARM необходимо наличие расширений ARM virtualization extensions, которые являются надстройкой технологии ARM TrustZone. Наличие расширений позволяет более гибко настраивать виртуальные машины и гипервизоры, что делает виртуализацию привлекательнее и доступнее.

Описанные варианты виртуализации могут быть использованы для создания изолированной среды при работе с потенциально опасным программным обеспечением. Таким образом, попытки взаимодействия с доверенным программным обеспечением будут пресечены не только на программном, но и на архитектурном уровне.

Несмотря на это, для технологии TrustZone и связанной с ней доверенной среды было обнаружено более 130 уязвимостей, большая часть из которых относится к ошибкам ядра и драйверов доверенной среды выполнения [2]. Среди них существуют такие, которые позволяют вычитывать доверенную информацию при работе процессора в недоверенном режиме [3]. Также существуют устройства, в которых компоненты доверенной среды выполнения предварительно загружены и не подлежат изменению. Соответственно, в доверенной среде возможно наличие вредоносных программ, а также непреднамеренных ошибок, создающих уязвимости. Использование устройств с возможностью перезаписи доверенной ОС и драйверов защищает от потенциальных угроз и предотвращает возникновение уязвимостей, а в случае их обнаружения позволяет перезаписать ОС.

Заключение

Использование виртуализации изолирует потенциально опасное программное обеспечение, что повышает доверенность системы. При этом стоит учитывать, что на данный момент активно продолжаются исследования по поиску уязвимостей в технологии ARM Trustzone, поэтому есть вероятность существования неописанных уязвимостей, которые позволяют скомпрометировать систему. Но даже в этом случае уровень доверенности и информационной безопасности при использовании технологии ARM TrustZone выше, чем при ее игнорировании.

Литература

1. ARM Security Technology Building a Secure System using TrustZone Technology // ARM Limited, 2009. — С. 3–6-3-16.
2. Pinto S., Santos N. Demystifying Arm TrustZone: A Comprehensive Survey // ACM Computing Surveys, 2019. Vol. 51. № 6. P. 19–24.
3. Бесплатная база данных уязвимостей. [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.cvedetails.com/google-search-results.php?q=arm+virtualization#gsc.tab=0&gsc.q=arm%20virtualization&gsc.sort=date> (дата обращения 15.08.2023).

УДК 621.382.323: 536.48

Исследование надежности алюминиевой металлизации доверенных интегральных схем при повышенных температурах**Афанасьев М. С.¹, Беспалов А. В.¹, Гераськин А. А.¹, Голикова О. Л.¹, Куликов Д. В.², Муравьева А. А.¹, Смирнов Д. О.¹, Харитонов И. А.³, Шабардин Р. С.²**¹ *Наноцентр МИРЭА**г. Москва, 5-я улица Соколиной горы, 22*² *АО «НИИМА «Прогресс»**125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54*³ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)**123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*

Экспериментально исследован процесс рекристаллизации алюминиевых проводников интегральных микросхем (ИМС), рассчитанных на работу в диапазоне $-40...+60^{\circ}\text{C}$, при температуре $+80^{\circ}\text{C}$. Выявлены дефекты, появившиеся вследствие рекристаллизационных процессов в Al-проводниках ИМС. Предложены технологические решения, позволяющие повысить надежность Al-проводников при повышенных температурах.

Ключевые слова: рекристаллизация; электромиграция; интегральная микросхема; температурный диапазон; диффузия; надежность.

Алюминиевая металлизация широко используется при производстве микросхем различной степени интеграции вследствие своей дешевизны, доступности и других положительных свойств. Наряду с известными плюсами данному типу металлизации присущ существенный недостаток — ограниченный температурный диапазон. Известно, что ИМС, работавшие при температуре ок. $+80^{\circ}\text{C}$, выходили из строя по причине рекристаллизации и последующей электромиграции в алюминиевой шине.

Исследование надежности алюминиевых проводников ИМС проводилось при нагреве корпусов микросхем до температуры $+80^{\circ}\text{C}$. Анализ кросс-секций участков металлизации в слоях ИМС позволил выявить дефекты в алюминиевой шине, появившиеся вследствие рекристаллизации и электромиграции. В образцах ИМС, подвергнутых нагреву до $+80^{\circ}\text{C}$, выявлены признаки рекристаллизации алюминиевых проводников. В образцах, на которые во время нагрева дополнительно подавалось рабочее напряжение, выявлены признаки электромиграции алюминия, следствием которой явилось разрушение верхних слоев металлизации и изолирующего слоя. При этом в нижних слоях ИМС признаки рекристаллизации и электромиграции отсутствовали.

Полученные результаты позволили выявить механизм отказов ИМС при температурах, превышающих верхнюю границу рабочего температурного диапазона.

Предложены конструктивно-технологические решения, позволяющие повысить температурную устойчивость алюминиевой металлизации ИМС.

УДК 621.3.049

Процедуры контроля доверенности при разработке ЭКБ в САПР с открытым исходным кодом

Аряшев С. С.^{1,2,3}, Корнеева Е. В.^{1,2}, к. т. н. Краснюк А. А.^{2,4},
к. т. н. Петров К. А.²

¹ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.s.aryashev@yandex.ru

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aakr@cs.niisi.ras.ru

³ АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125284, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1
aryashev@npc-ses.ru

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru

Рассмотрены риски недеклалируемых возможностей для САПР OpenLANE. Для борьбы с недеклалируемыми возможностями предложена процедура контроля, включающая соблюдение разработанных требований безопасности для САПР OpenLANE, процессов цифровой гигиены в содержании пакетов, прохождение разработанных контрольных точек в САПР с открытым исходным кодом и использование контрольных меток.

Ключевые слова: OpenLANE; ЭКБ; НДВ; контрольные точки; контрольные метки.

Введение

В 2022 году компании, поставляющие САПР на территорию РФ, приостановили сотрудничество с отечественными разработчиками [1]. Однако и среди программ с открытым исходным кодом существуют инструменты САПР, объединяющие в себе полные маршруты проектирования ЭКБ. Одним из таких САПР является OpenLANE. Правила цифровой безопасности для коммерческих САПР и для OpenLANE, использующихся при проектировании ЭКБ, существенно отличаются по целому ряду направлений.

САПР OpenLANE

OpenLANE — САПР, предназначенная для синтеза физического топологического представления моделей аппаратуры на основе RTL-моделей, написанных на языке Verilog [2].

Для снижения рисков внедрения НДВ в САПР необходимо проводить тщательное тестирование и анализ возможных последствий внедрения НДВ [3]. Также необходимо следовать стандартам и требованиям, чтобы убедиться, что продукт правильно проектируется и безопасен.

Процедуры контроля

Для проектирования ЭКБ важно, чтобы все файлы были доверенными. Для выполнения такого требования необходимо соблюдать определенные процедуры контроля:

- выполнение требований по безопасности;
- внедрение процессов цифровой гигиены в содержание пакетов;
- прохождение контрольных точек.

Требования безопасности

Для обеспечения безопасного использования OpenLANE был разработан перечень требований к рабочему месту и процессу работы:

1. Использовать идентификацию и аутентификацию пользователей.
2. Определить правила доступа к АРМ в рабочее и нерабочее время, а также в нестандартных ситуациях.
3. Обеспечить контроль и защиту сетевого трафика с помощью межсетевого экранирования.
4. Отключить неиспользуемые функции OpenLANE.
5. Провести испытания по выявлению недекларированных возможностей.
6. Обеспечить регистрацию событий безопасности в журнале, проводить регулярный аудит.
7. Для систем хранения данных обеспечить источники резервного питания.
8. Использовать аппаратно-программную систему сетевой безопасности, предназначенную для обнаружения (предотвращения) сетевых атак и аномалий (IDS).
9. Реализовать защиту базы данных путем шифрования данных.

Процессы цифровой гигиены в содержании пакетов

Организация Linux Foundation совместно с GitHub, Google, IBM, JPMorgan Chase, Microsoft, NCC Group, OWASP Foundation и Red Hat разработала совместный проект OpenSSF (Open Source Security Foundation) [4], цель которого — обезопасить ПО с открытым исходным кодом.

Контрольные точки

Контрольные точки — обязательные этапы проектирования, являющиеся дополнительным тестовым покрытием при проектировании ЭКБ. При анализе возможностей и работе в САПР OpenLANE были определены контрольные точки, представленные в табл. 1.

Заключение

Производители приетарного программного обеспечения вынуждают пользователей согласиться с тем уровнем безопасности, который им предлагается. Столь же высокие риски существуют и для проектов с открытым исходным кодом, они обусловлены прозрачностью кода и фактически бесконтрольным доступом к нему. Предложенные процедуры контроля доверенности при разработке ЭКБ в САПР с открытым исходным кодом позволяют минимизировать риск внедрения недекларируемых возможностей на примере САПР OpenLANE. Модельные эксперименты с программной инъекцией ошибок показали эффективность данной методики.

Таблица 1. Контрольные точки в маршруте контролируемого проектирования ЭКБ
в САПР с открытым исходным кодом OpenLANE

№ п.	Наименование контрольной точки в САПР OpenLANE	Описание контрольной точки
Проверка корректности входных данных		
1	check_synthesis_failure	Проверка синтезируемости СБИС
2	check_floorplan_missing_pins	Сравнение направления контактов для LEF/LIB/VERILOG
Верификация логического и физического нетлистов		
3	quit_on_tr_drc	Проверка DRC для пользовательских GDS-файлов и списка элементов
4	run_antenna_check	Проверка блоков на наличие Antenna
5	quit_on_tr_drc	Поэлементные проверки для DRC
Проверки DRC и LVS		
6	quit_on_magic_drc	Проверка на DRC-нарушения
7	quit_on_lvs_error	Проверка на LVS-нарушения

*Публикация выполнена в рамках государственного задания
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме FNEF-2022-0004*

Литература

1. Tadviser. Инженерное программное обеспечение (рынок России). — URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>.
2. OpenLANE. — URL: <https://openlane.readthedocs.io>.
3. Волосатова Т. М., Чичварин И. Н. Структурное моделирование угроз информационной безопасности систем автоматизированного проектирования.
4. OpenSSF (Open Source Security Foundation). — URL: <https://openssf.org>.

УДК 621.3.049

Подсистема верификации на основе цепочек доверия нетлиста программной модели доверенной СБИС

Аряшев С. С.^{1,2,3}, к. т. н. Краснюк А. А.^{2,4}

¹ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.s.aryashev@yandex.ru

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт»
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aakr@cs.niisi.ras.ru

³ АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125284, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1
aryashev@npc-ses.ru

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru

Приводятся результаты анализа разрабатываемых и существующих решений для проверки нетлиста программной модели доверенной СБИС на основе хеш-таблиц или цепочек доверия. Показан пример реализации алгоритма проверки нетлистов, полученных при проектировании, на основе разработанного комплексного bash-скрипта.

Ключевые слова: КМОП; HashTable; SiP; trusted root keys.

Введение

В процессе проектирования доверенных СБИС и систем в корпусе (SiP) разработчикам приходится сталкиваться с проблемами обеспечения доверия к результатам выполнения проектов на основе применения Open-Source САПР. Представляет интерес проверка на наличие недокументированных ошибок при выполнении синтеза топологий применения алгоритмов на основе хеш-таблиц или цепочек доверия (HashTable). Реализация данного алгоритма требует вычисления хеш-функции от ключа, которым может являться нетлист какого-либо функционального или библиотечного модуля. Связанные модули, таким образом, формируют связанный список — таблицу из цепочек доверия, где функциональные связи по ключу дополняются индексами значений, например данными координат модулей, формируемых в результате выполнения штатных проверок GDS-файлов топологий модулей. Обратное преобразование GDS — нетлист позволяет сформировать зеркальный хеш-образ синтезированной топологии. В случае ошибок в топологии, а также программного внедрения САПР НДВ наборы пар <ключ>:<значение> для прямого и обратного преобразования окажутся различными. Позиция несовпадения хеш-функций локализует часть нетлиста, где обнаружена коллизия, требующая внимания и контроля.

Алгоритм хеширования для нетлистов

Хеш-функция $h(x)$ — это функция, принимающая на входе в качестве аргумента информационную последовательность (прообраз) M произвольной длины и дающая на выходе в качестве результата $h(M)$ информационную последовательность

(хеш-образ) фиксированной длины [1]. Пусть $\{0, 1\}^m$ — множество всех двоичных строк длины m , $\{0, 1\}^*$ — множество всех двоичных строк конечной длины. Тогда хеш-функцией h называется преобразование вида $h: \{0, 1\}^* \rightarrow \{0, 1\}^m$, где m — размерность хеш-образа. Процесс хеширования состоит из двух многоэтапных этапов: ввод и вывод. Существуют два подхода к проектированию качественной хеш-функции: проектирование «с нуля» и построение функции хеширования на основе использования функции блочного стохастического преобразования. Примером реализации первого подхода может являться хеш-функция MD5 — формальный мировой стандарт на функцию хеширования. Примером реализации второго подхода может являться хеш-функция Whirlpool, построенная на основе блочного преобразования [2]. Собственно, хеш-таблица рассматривается как структура данных, которая использует хеш-функцию для сохранения и извлечения значений с определенными ключами.

Алгоритм выполнения проверок на основе анализа хеш-таблиц включает следующие шаги:

1. Построение цепочек доверия.
2. Генерация хешей.
3. Поиск значений и проверка цепочек.
4. Обработка и обновление хеш-таблицы.

Реализованный алгоритм для проверки нетлистов

Для проверки нетлистов, полученных при проектировании средствами Open-Source САПР, был разработан комплексный скрипт startup. Для тестирования работоспособности скрипта startup были сделаны контрольные проверки: сравнение нетлистов, неизмененных и с недеклалируемыми изменениями при синтезе топологии. Результат испытаний фиксируется в текстовом файле hash_report.txt и показан на рис. 1. Локализация точки коллизии определяется по номеру несовпадений в цепочке доверия или хеш-таблицы.

```

S#####
22-06-2023 23:55 MD5: c96acb11aa1ee2cd78dc46a2a577607
22-06-2023 23:55 MD5: c96acb11aa1ee2cd78dc46a2a577607
#####
22-06-2023 23:55 MD5: c96acb11aa1ee2cd78dc46a2a577607
22-06-2023 23:55 MD5: f1417344edd163147587a8ec2ef58ee3
#####
    
```

Рис. 1. Содержание текстового файла hash_report.txt после тестирования работоспособности скрипта startup

Заключение

На примере разработанной подсистемы проверки нетлиста программной модели доверенной СБИС показана применимость алгоритмов проверок на основе формирования цепочек доверия из хеш-функций и хеш-таблиц. Позиция несовпадения хеш-функций локализует конкретную часть нетлиста, где обнаружена коллизия, требующая дополнительной проверки и контроля. В случае если ключи в виде нетлистов известны заранее (например, для проприетарных СФ-блоков), разработанный алгоритм позволяет сформировать оптимальную хеш-функцию, которая оптимизирует цепочки и таблицы доверия при выполнении синтеза топологий Open-Source САПР.

Литература

1. Иванов М. А., Комаров Т. И., Саликов Е. А., Чепик Н. А. Хеш-функция на основе 3D стохастических преобразований // Информационные войны, 2019. — № 4. — С. 71–76.
2. Ah Kioon, Mary Cindy, Wang Z., Deb Das S. Security Analysis of MD5 Algorithm in Password Storage // Applied Mechanics and Materials, 2013. Vol. 2706–2711.
3. Иванов М. А., Чугунков И. В. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях: Учебное пособие / Под ред. М. А. Иванова. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

УДК 004.942

Аналитическая зависимость накопленного в МОП-транзисторе заряда от длины пробега тяжелой заряженной частицы при различных углах ее пролета

Глушко А. А., Гусев М. Р., Морозов С. А.

ФГУ ФНИЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

MichaelG@mail.ru

Проведено исследование зависимости накопленного заряда в МОП-транзисторе от длины пробега тяжелой заряженной частицы (ТЗЧ) в области, рассматриваемой в качестве чувствительной. Подтверждена гипотеза о высокой точности аппроксимации упомянутой зависимости линейной функцией.

Ключевые слова: КМОП-технология; приборно-технологическое моделирование; тяжелая заряженная частица.

Введение

Создание сбоеустойчивой элементной базы электроники требует наличия достоверного математического аппарата, с достаточной точностью описывающего различного рода радиационные воздействия на интегральную микросхему и при этом обеспечивающего возможность его применения на этапах схемотехнического проектирования. Комплексную задачу разработки такого математического аппарата осложняет большое количество различных технологических процессов, конструктивных решений элементов схем и видов радиационного воздействия.

В настоящей работе проводится исследование воздействия ТЗЧ на КНИ МОП-транзистор, сформированный по технологии с минимальной проектной нормой 0,35 мкм. Методика исследования может быть в дальнейшем распространена и на транзисторы, сформированные по другим технологиям. Результатом этого исследования должна стать аналитическая зависимость величины заряда, накопленного в результате воздействия ТЗЧ от длины пробега этой частицы в слое отсеченного кремния МОП-транзистора, поскольку величина этого заряда определяет сбоеустойчивость одного из критических элементов микросхемы — ячейки статической оперативной памяти (СОЗУ) [1].

Построение аналитической зависимости накопленного заряда в КНИ МОП-транзисторе от длины пробега пролетающей через него ТЗЧ в первом приближении

В качестве объекта исследования рассматривалась двумерная приборно-технологическая модель n -канального КНИ МОП-транзистора, изготавливаемого по технологическому процессу с минимальной проектной нормой 0,35 мкм. При расчетах транзистор в момент попадания в него ТЗЧ находился в закрытом состоянии при напряжении на сток-исток +3,3 В.

Известно, что в приборах с конструкцией, подобной исследуемому транзистору, можно выделить области, наиболее чувствительные к воздействию ТЗЧ. Пролет частицы через такую область с наибольшей вероятностью приводит к возникновению сбоя. На рис. 1 схематично представлена модель исследуемого прибора.

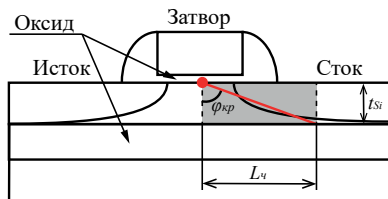


Рис. 1. Схематичное изображение КНИ МОП-транзистора

На рисунке отмечена чувствительная область — прямоугольник длиной $L_u \approx 0,45$ мкм и высотой $t_{Si} \approx 0,17$ мкм. Предполагалось, что чувствительная область охватывает тело и LDD-область стока транзистора, а ее протяженность определялась экспериментально [2].

Моделирование проводилось с использованием уравнений гидродинамической модели для иона криптона с энергией 150 МэВ, величина линейной потери энергии (ЛПЭ) которого равнялась 0,4 пКл/мкм [3]. Предполагалось попадание ТЗЧ в отмеченную на рисунке область под разными углами с начальной точкой в вершине прямоугольника.

Таким образом, длину пролета ТЗЧ описывает система уравнений вида

$$L = \begin{cases} \frac{t_{Si}}{\cos \varphi}, & \varphi < \varphi_{кр} \\ \frac{t_{Si}}{\cos \varphi} = \frac{L_u}{\sin \varphi}, & \varphi = \varphi_{кр} \\ \frac{L_u}{\sin \varphi}, & \varphi > \varphi_{кр}, \end{cases}$$

где $\varphi_{кр}$ — значение угла, превышение которого означает пересечение ТЗЧ границы чувствительной области в теле транзистора.

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

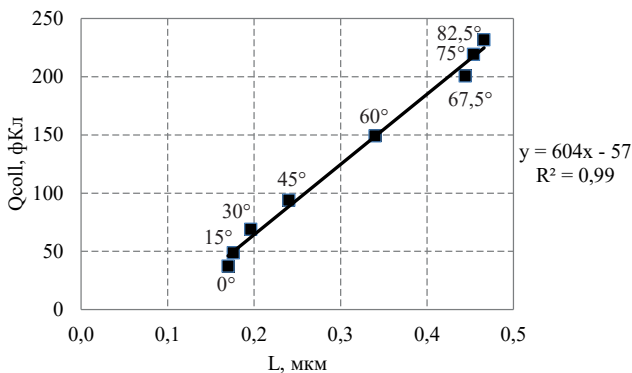


Рис. 2. Зависимость накопленного заряда от длины пробега ТЗЧ

На графике видна явная линейная зависимость с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,99$. Такая зависимость сохраняется при углах падения ТЗЧ $\varphi \leq 82,5^\circ$. При больших значениях угла φ (например при 87°) было установлено существенное отклонение от линейной зависимости.

Заключение

Полученные результаты подтверждают гипотезу о линейной зависимости накопленного в слое отсеченного кремния заряда от длины пробега ТЗЧ в чувствительной области, покрывая большую часть вариаций углов пролета ТЗЧ через прибор. В дальнейшем предполагается построить второе приближение модели, позволяющее уточнить исследуемую зависимость при углах от 0 до 90° ; это планируется сделать с учетом того, что генерация электрон-дырочных пар происходит в некотором объеме, а не просто вдоль длины трека.

Литература

1. Dodd P. E., Sexton F. W. Critical Charge Concepts for CMOS SRAMs // IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 42. № 6. December, 1995.
2. Чистяков М. Г., Глушко А. А., Морозов С. А. Исследование чувствительной области КНИ МОП-транзистора к воздействию вторичных частиц, возникающих вследствие облучения нейтронами // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № 57 (107). — С. 307–310.
3. Glushko A. A., Zinchenko L. A., Shakhnov V. A. Simulation of the impact of heavy charged particles on the characteristics of field-effect silicon-on-insulator transistors // Journal of communications technology and electronics, 2015. Vol. 60. № 10. P. 1134–1140.

УДК 519.876.5

Анализ алгоритмов и методов оптимизации логического синтеза, их сравнение и реализация в современных САПР микроэлектроники**Мальшев Н. М.***АО «ЭРЕМЕКС»**117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108**malyshev.n@eremex.ru*

Создана отечественная система автоматизированного проектирования микроэлектроники и логической оптимизации синтеза исходных кодов микросхем. В программном пакете реализованы алгоритмы анализа, интерпретации входных данных с последующим построением цифровых схем комбинаторной логики и их оптимизации.

Ключевые слова: САПР; HDL; ПЛИС; СнК; функциональная верификация; ГАС; синтез; статический анализ; SOP; AIG.

Рост размеров кристаллов при разработке СБИС привел к необходимости постоянного развития теории и практики автоматизированного проектирования. В современных САПР проектирования микроэлектроники большое значение уделяется алгоритмам, позволяющим сократить количество базисных элементов, использующихся в проектах СБИС, без потери функциональности [1].

Одной из наиболее трудоемких стадий проектирования цифровых микросхем является этап функционально-логического проектирования, теоретической основой которого является задача минимизации булевых функций. Получение множества всех простых импликант булевой функции уже для числа независимых переменных $n > 10$ может потребовать значительной памяти и большого времени работы ЭВМ, даже с учетом применения динамического программирования — разбиения задачи на более простые подзадачи. На практике задача поиска оптимального решения минимизации булевых функций является полиномиально неразрешимой и используются различного рода эвристические алгоритмы.

Одним из эвристических подходов к задаче минимизации булевых функций является алгоритм Куайна—Мак-Класки для получения сокращенной ДНФ (дизъюнктивной нормальной формы), в котором используется склеивание каждой импликанты с каждой. Склеенные импликанты помечаются, процедура повторяется до исчерпания неповторяющихся импликант с сокращающимися на каждом ее этапе рангами. Данный метод отличается простотой аппаратной реализации, но требует большого объема памяти и характеризуется большой комбинаторной сложностью. Стоит отметить, что данные алгоритмы использовались и применялись в САПР логического синтеза в 80-е годы прошлого столетия, они успешно справлялись с оптимизацией цифровых схем с небольшим количеством независимых переменных [2].

На текущий момент в САПР широко применяются алгоритмы сокращения схем комбинаторной логики, использующие ориентированные ациклические графы (DAG), в частности AIG (and-inverted graph, конъюнктивно-инверсный граф). Вершины конъюнктивно-инверсного графа представлены конъюнкцией,



ребра могут опционально содержать инверсию. Логические элементы и нетлистсы — множество соединенных логических элементов, представленные в подобном виде, позволяют производить работу по оптимизации. Сокращение ребер позволяет уменьшить площадь проектируемого кристалла без увеличения задержек, а балансировка графа позволяет минимизировать задержки без увеличения площади кристалла. Оконная функция графа, в рамках которого проводится локальная оптимизация, за счет поиска противоречий, поглощений, идентичности и пр. на различных глубинах вложенности графа [3] позволяет в конечном выделить и значительно сократить логическую схему комбинаторной логики. Кроме того, при построении же самой логической схемы (нетлиста) из графа существует ряд методологий, позволяющих сократить площадь кристалла.

Комбинация указанных выше алгоритмов, первый (Куайна—Мак-Класки) — для минимизации булевых функций до 10 переменных, второй (AIG) — от 10 до 1000, позволяет значительно ускорить процесс логического синтеза цифровых схем.

Сравнение работы реализованных алгоритмов синтеза («кремниевой компиляции») производится с общедоступными инструментами AIGGER, ABC, а также коммерческими синтезаторами западных компаний на популярных бенчмарках.

Сравнение показало, что алгоритмы работоспособны, их использование в САПР микроэлектроники может составить конкуренцию аналогам.

Литература

1. Малышев Н. М., Рыбкин С. В. Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» (г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019). — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 278—281.
2. Лузин С. Ю. Минимизация булевых функций на основе синтеза распределения термов по индексам // Сб. науч. трудов учебных институтов связи, 1996. — Вып. 162. — С. 27—30.
3. Possani V. N., Lu Y.-S., Mishchenko A., Pingali K., Ribas R. and Reis A. Unlocking fine-grain parallelism for AIG rewriting // Proc. ICCAD'18.

УДК 621.382

Методы и алгоритмы топологической проверки взаимосогласованных приборов и генерации фиктивных топологических элементов во взаимосогласованных структурах

Равилов М. Ф.*ООО «НМ-Тех»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а
ravilov@nm-tech.org*

Современные программные комплексы физической верификации (ПКФВ) не предоставляют встроенных возможностей проверки идентичности топологий взаимосогласованных приборов, применяющихся в аналоговых схемах. В статье предложены алгоритм подобных проверок и его реализация на базе одного из передовых ПКФВ.

Ключевые слова: XOR; DRC; взаимосогласованные приборы.

Введение

Верификация идентичности топологий взаимосогласованных приборов (matched devices), таких как дифференциальные пары и токовые зеркала, представляет серьезную проблему, поскольку встроенные в программные комплексы физической верификации (ПКФВ) проверки структур основаны на статических шаблонах. Это могут быть XOR-проверки «золотыми» ячейками (golden cell checks) или шаблонами (pattern checks) [1–3]. Оба типа проверок нуждаются в предопределенных настройках на библиотеку шаблонов и могут требовать идентичности геометрий полигонов на каждом уровне иерархии проверяемой топологии. Но, самое главное, статичные шаблоны не могут быть приложены к параметризуемым ячейкам (P-cells) аналоговых приборов, создающим геометрии произвольной формы для каждого набора параметров. Как следствие, отсутствие встроенных методов верификации группы приборов может привести к существенным топологическим расхождениям и критическому рассогласованию электрических характеристик из-за различного влияния эффектов близости и паразитных элементов.

Методы и алгоритмы топологической проверки взаимосогласованных приборов

Для решения проблемы проектирования топологий прецизионных аналоговых схем с взаимосогласованными приборами был создан алгоритм динамического создания шаблона на основе первого прибора из группы и его автоматической подстановки на всех членов группы. Этот алгоритм проверки был также расширен возможностью заполнения пространства приборов идентичной структурой фиктивных топологических элементов (dummy shapes) для выполнения правил локальной плотности технологических слоев, обычно разводочных металлов.

Реализованный метод проверки идентичности топологии и генерации фиктивных элементов с симметричной структурой требует на вход от пользователя группу приборов и список проверяемых слоев. Группа приборов в топологии может определяться текстовой меткой или специальным маркерным полигоном.

Проверки и генератор работают только с геометриями слоев и не зависят от иерархии топологии. Взаимная ориентация приборов определяется по их базовым регионам: карманам, активным областям и затвору. Кроме топологических XOR-ошибок, во вспомогательную базу данных выводится полезная пользователю информация об идентификаторе прибора-шаблона и вариантах его ориентации. Техническое воплощение алгоритма было сделано на основе ПКФВ от компании Siemens (Германия) с использованием встроенных DFM-команд `property`, `shift` и `transform` и программных конструкций на языке Tcl [4].

Заключение

Созданный алгоритм проверки топологической идентичности приборов в группе позволил команде «НМ-Тех» расширить верификационные возможности своих Process Design Kits новыми проверками Design Rule Check (DRC) и генератором симметричных структур фиктивных топологических элементов. Как результат, проектирование прецизионных аналоговых блоков на основе техпроцессов «НМ-Тех» стало более быстрым и надежным. Рассогласование элементов диагностируется на более раннем этапе DRC-верификации, чем ресимуляция экстрагированной из топологии схемы, а новые DRC-проверки могут указывать на рассогласования, не учитываемые Spice-моделями. В конце концов послойные XOR-ошибки мгновенно указывают на первопричину рассогласования и не требуют сложного анализа влияний различных паразитных параметров и элементов схемы.

Литература

1. White M. Pattern Matching In Design And Verification. Exploring powerful new applications for pattern matching. <https://semiengineering.com/pattern-matching-in-design-and-verification>. May 19, 2016.
2. Wang Sh., Chen Y., Wang T., Chen O. An Algorithm for Rule-based Layout Pattern Matching // IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), 2020.
3. Dillinger T. Layout Pattern Matching for DRC, DFM, and Yield Improvement. 2016. <https://semiwiki.com/semiconductor-manufacturers/samsung-foundry/5840-layout-pattern-matching-for-drc-dfm-and-yield-improvement>.
4. Standard Verification Rule Format (SVRF) Manual, Siemens EDA, Software Version 2019.3.

УДК 621.382

Экстракция паразитных приборов и параметров методом разбиения на конечные элементы для учета растекания токов в межсоединениях высокоомощных ДМОП-транзисторов**Равилов М. Ф., Евстигнеев С. В.***ООО «НМ-Тех»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,**этаж 1, помещение XII, офис 4,4а**ravilov@nm-tech.org, evstigneev@nm-tech.org*

Стандартные САПР экстракции паразитных элементов не учитывают распределение тока в металлической разводке стока-истока высокоомощных ДМОП-транзисторов. В статье предложено решение данной проблемы на основе метода конечных элементов и описана его интеграция в стандартный маршрут проектирования ИС.

Ключевые слова: экстракция; паразитные элементы; метод конечных элементов; ДМОП-транзистор.

Введение

Внутренняя металлическая разводка современных мощных ДМОП-транзисторов [1] прецизионных аналоговых блоков, например, в ИС управления питанием [2] выполняется во всех доступных слоях металлизации и имеет сложную геометрию за счет множественной перфорации металла и специальной структуры массивов переходных окон. Это позволяет максимально возможно уменьшить сопротивление открытого канала (RDSon) при одновременном выполнении топологических правил и правил электромиграции. Как следствие, сопротивление металлической части сток-истоковых областей таких транзисторов вносит значимую поправку в величину общего RDSon и должно учитываться автоматизированными средствами экстракции паразитных элементов. Стандартное применение таких САПР не позволяет выделить внутреннюю структуру распределенного сопротивления разводки на терминалах приборов, а значит, учесть растекание тока в структуре ДМОП-транзистора.

Экстракция паразитных резисторов в структурах ДМОП методом конечных элементов

Для аккуратного учета паразитного сопротивления металлической разводки сток-истоковых областей предлагается ввести специальный режим экстракции ДМОП-транзисторов, где каждый распознанный в топологии прибор представляется множеством таких же приборов, но с малой шириной канала и последовательно соединенными терминалами стоков и истоков. Технически такое решение реализуется внедрением виртуального разрезания монолитной топологии транзистора на одинаковые сегменты (за исключением краевых) вдоль длины канала. При такой структуре «идеального» экстрагированного нетлиста (netlist) стандартное САПР экстракции паразитных элементов дает желаемое множество паразитных резисторов металлической разводки и переходных окон, представляющее распределенное сопротивление сток-истоковых областей.

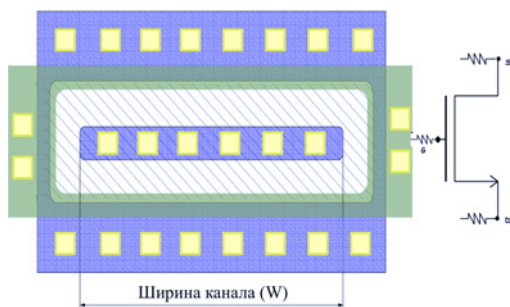


Рис. 1. Топология транзистора и результат стандартной экстракции паразитных элементов

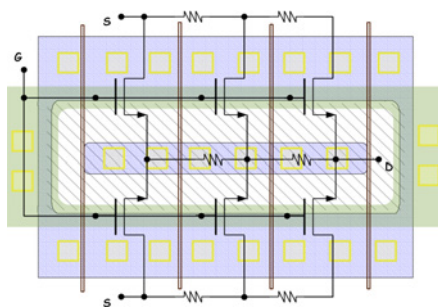


Рис. 2. Результат экстракции сегментов прибора с паразитными сопротивлениями

На рис. 1 и 2 демонстрируются восстановленные из топологии прибора электрические схемы с паразитными элементами, используя соответственно топологию ДМОП-транзистора «как есть» и топологию с предварительным виртуальным разрезанием на сегменты. Точность учета распределенного сопротивления металлизации сток-источковых областей прибора может быть контролируема пользователем через опцию количества сегментов для виртуальной нарезки в программе верификации топологии LVS (layout versus schematic). Поскольку ширины ДМОП-транзисторов в схемах могут достигать сотен микрон, то и количество транзисторных элементов в нетлисте с «нарезкой» может колебаться от десятков до тысяч на один топологический экземпляр. Это нужно учитывать при выборе вычислительных ресурсов для последующей электрической симуляции экстрагированной схемы в соответствующем САПР. Ключевым же условием применимости предлагаемого решения является масштабируемость SPICE-моделей ДМОП-транзисторов по ширине канала, позволяющая заменить монокристаллический большой транзистор множеством малых.

Заключение

Получение распределенного сопротивления металлизации сток-источковых областей ДМОП-транзисторов было воплощено в стандартном маршруте проектирования аналоговых и смешанных схем. В случае уже имеющихся масштабируемых

SPICE-моделей реализация метода конечных элементов сводится к созданию дополнительного режима LVS экстракции топологии ДМОП-приборов. Данный режим, названный LDMOS_CUT, может быть использован для топологий с любым сочетанием различных ДМОП-транзисторов и других приборных структур и предполагает свою активацию на этапе получения нетлиста с паразитными приборами и параметрами для финальной SPICE-симуляции сложнофункционального блока.

Литература

1. Pritiskutch J., Hanson B. Understanding LDMOS device fundamentals // Application note AN122, 2000. P. 1–4. <https://www.st.com>.
2. Ко К., Park J., Eum J., Lee K., Lee S., Lee J. Proposal of 0.13um new structure LDMOS for automotive PMIC. — 73rd Annual Device Research Conference, 21–24 June 2015, Columbus, OH, USA.

УДК 621.382

Verilog-A-модель эффекта вымораживания примеси в LDD-областях при криогенных температурах

Осыкин А. А., Потупчик А. Г., Панышев К. А.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валеева, 6, стр. 1

aosykin@niime.ru, apotupchik@niime.ru, kpanyshev@niime.ru

Рассмотрена практическая реализация моделирования эффекта вымораживания примеси в слаболегированных областях стока и истока (LDD) МОП-транзистора, которая заключается в моделировании этих областей Verilog-A-резисторами, зависимыми от напряжения сток-исток и от температуры.

Ключевые слова: SPICE; Verilog-A; КМОП; криогенные температуры; вымораживание примеси.

Введение

Коммерчески доступные библиотеки SPICE-моделей приборов, предоставляемые зарубежными фабриками отечественным дизайн-центрам, устанавливают температурный диапазон моделирования конечных устройств от -40°C до 125°C [1]. Следствием этого является непрогнозируемое, возможно, некорректное поведение модели прибора за пределами этого диапазона, как в области криогенных температур (ниже -153°C).

Эффект вымораживания примеси

Неполная ионизация примеси, известная как эффект вымораживания примеси, возникает в примесном полупроводнике при приближении уровня Ферми E_F к уровню энергии примеси E_A . Для полупроводника p -типа концентрация ионизированных акцепторов определяется общей концентрацией легированной примеси N_A и функцией распределения Ферми — Дирака $f(E_A)$:

$$N_A^- = N_A \cdot f(E_A) = \frac{N_A}{1 + g_A e^{\frac{E_A - E_F}{kT}}}, \quad (1)$$

где $g_A = 4$ — фактор вырождения. Формула (1) показывает, что для температуры, при которой уровень Ферми достигает примесного уровня $E_F = E_A$, количество ионизированных акцепторов (или, другими словами, количество свободных носителей заряда) составляет 20 % от всей концентрации имплантированной примеси.

Неполная ионизация примеси тем сильнее проявляется, чем меньше степень легирования полупроводника, и поэтому для МОП-транзистора наиболее актуально учитывать этот эффект в моделях слаболегированных областей стока и истока (LDD-областей). На рис. 1а показана макромодель транзистора, для которой LDD-области моделируются отдельно с помощью резисторов R_{LDD} .

В основе модели R_{LDD} резистора лежит предположение, что его сопротивление обратно пропорционально степени ионизации примеси:

$$R_{LDD} = R_{DSW} \cdot \frac{N_A}{N_A^-},$$

где R_{DSW} — последовательное сопротивление стока или истока в отсутствие эффекта вымораживания примеси. Концентрация N_A^- является функцией напряжения на стоке V_D и температуры, и поэтому R_{LDD} зависит от V_D и T , как показано на рис. 1б.

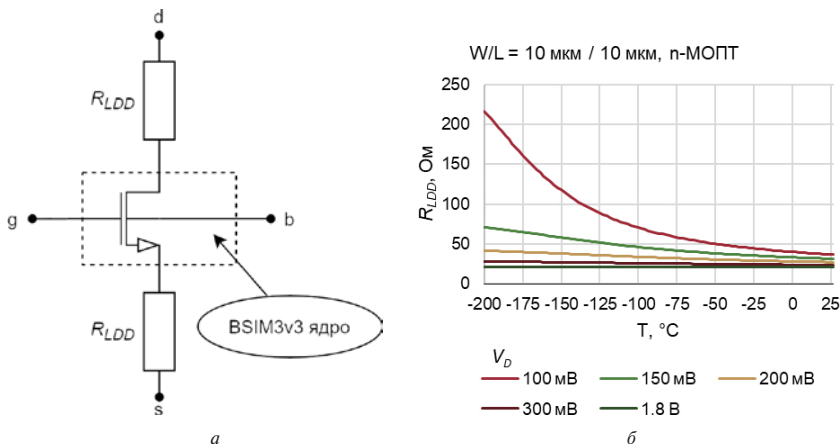


Рис. 1. Макромодель транзистора с учетом эффекта вымораживания (а); график зависимости $R_{LDD}(V_D, T)$ (б)

Заключение

Модель R_{LDD} -резистора была реализована на языке Verilog-A и верифицирована по данным приборно-технологического (TCAD) моделирования. Данная модель вводит новый характер поведения паразитного последовательного сопротивления МОП-транзистора:

- 1) R_{LDD} зависит от V_D и сильно возрастает в линейной области работы прибора;
- 2) характер зависимости R_{LDD} от температуры неоднородный: для больших значений V_D сопротивление R_{LDD} почти постоянно во всем диапазоне температур, тогда как в линейном режиме R_{LDD} испытывает сильный рост при уменьшении температуры.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.

УДК 621.3.049.774

Продвинутая автоматизация тестирования сложнопараметризованных топологических ячеек PDK для автоэлектроники

Слезкин В. В., Бритвин А. А., Кондратьев С. А.

ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а

slezkin@nm-tech.org, britvin@nm-tech.org, kondratev@nm-tech.org

Разработка интегральных приборов для нужд автомобильной электроники подразумевает их реализацию в виде сложнопараметризованных топологических ячеек в PDK (Process Design Kit). Высокая трудоемкость решения данной задачи требует применения развитых средств автоматизации тестирования.

Ключевые слова: топологические ячейки; параметризация; физическая верификация; автоматизация тестирования; генерация тестовых структур; экстракция; ДМОП-транзистор.

Описание решаемой проблемы

В современной автоэлектронике применяется широкий спектр приборов от стандартных МОП- до высоковольтных ДМОП- (LDMOS) транзисторов и высокопрецизионных конденсаторов, предполагающих гибкие настройки изоляционных структур и топологии разводки внутри приборов [1]. Создание подобных приборов в топологическом проекте с неизбежностью требует применения параметризованных ячеек (P-Cell), поставляемых в составе PDK и формирующих валидированную структуру со SPICE-моделью и характеристиками надежности. Большой спектр приборов определяется необходимостью покрыть большой диапазон напряжений питания. Кроме того, практически для каждого прибора необходимо поддерживать большое количество P-Cell-параметров со сложными зависимостями между ними. Подобные сложнопараметризованные ячейки, безусловно, должны соответствовать высоким требованиям к качеству. В связи с чем актуальной является разработка автоматизированных средств тестирования подобных ячеек [2, 3].

Предлагаемое решение

Для качественного тестирования P-Cell необходимо покрыть в тестовой последовательности все топологические параметры. При этом для каждого параметра необходимо задать группу значений из разрешенного диапазона, проверить на корректность прорисовку топологии P-Cell в процессе исполнения (evaluation). Сложность задачи определяется высокой размерностью матрицы тестовых значений. Так, для типичного набора параметров на прибор (порядка 20) даже при минимальном переборе значений (по два значения на параметр) необходимо построить тестовую ячейку с более чем 1 млн экземпляров P-Cell. Подобная тестовая ячейка, состоящая из схематического (schematic) и топологического (layout) представлений, не может быть реализована, так как приводит с неизбежностью к переполнению памяти и разрушению рабочей сессии (core dump). Решением данной блокирующей проблемы является декомпозиция матрицы тестовых значений до приемлемого размера.

В рамках данной работы был предложен математический метод построения матрицы параметризации на основе аппарата теории множеств, теории графов, булевой алгебры и комбинаторики. Для расчета допустимых значений параметров метод учитывает наличие условных выражений (функций) у параметров, определяющих допустимые диапазоны вариаций независимых параметров-аргументов. Это позволяет пользователю программы более точно и с меньшими вычислительными затратами оценить размер конечной матрицы комбинации параметров, на основании которой можно реализовать необходимую декомпозицию [4].

Для генерации матрицы комбинаций параметров предложен специальный быстроедействующий алгоритм, учитывающий математические закономерности при построении комбинаций. Полученная указанным способом матрица комбинации параметров — это теоретический предел (идеал), достижению которого, как правило, препятствуют ограничения, накладываемые через специальные процедуры контроля значений параметров (callbacks). Это приводит к отклонению от заданной матрицы комбинации параметров и, как следствие, к уменьшению количества уникальных экземпляров P-Cell в тестовой ячейке. Для решения данной задачи предложен метод оценки качества конечной параметризации, полученной после применения исходной матрицы на конкретном приборе. Полученная оценка позволяет добиться максимальной эффективности тестирования за счет исключения повторяющихся тестовых структур.

Заключение

Разработанная и внедренная платформа автоматизированного тестирования PDK получила продвинутый модуль для P-Cell с возможностью тестировать приборы на миллионах уникальных комбинаций параметров. Реализованные эффективные настройки, быстрые вычисления в САПР, удобный просмотр результатов и дополнительные диагностики позволили обеспечить высокое качество PDK с большим количеством сложнопараметризованных приборов, разрабатываемых «НМ-Тех» для аналоговых и смешанных ИС, включая микросхемы автоэлектроники.

Литература

1. Ко К., Park J., Eum J., Lee K., Lee S., Lee J. Proposal of 0.13um new structure LD-MOS for automotive PMIC. — 73rd Annual Device Research Conference, 21–24 June 2015, Columbus, OH, USA.
2. Automated P-cell XOR with instance level reporting, CDNLive, Cadence user Conference 2018, Albert Britvin, Mikhail Raviлов, Sergey Yevstigneev, Vladimir Slezkin, NXP Semiconductors.
3. Загидулина О. Р., Надин А. С., Трифанихина И. Е., Шипицин Д. С. Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, 2019. —Т. 9. — № 4. — С. 80–84.
4. Кнут Д. Искусство программирования. — М.: изд-во «Вильямс», 2019 г.

УДК 621.3.049.77

Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм

Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., к. т. н., Новиков А. А.,
Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

dkopeikin@niime.ru

Представлена конструкторско-технологическая платформа проектирования для отечественной технологии КМОП КНИ 180 нм: комплект библиотек стандартных цифровых и интерфейсных элементов, компиляторы памяти; проведено сравнение платформ проектирования для технологий КМОП 180 нм и разработанной платформы.

Ключевые слова: конструкторско-технологическая платформа проектирования; библиотеки стандартных цифровых элементов; библиотеки интерфейсных элементов ввода-вывода; комплект средств проектирования; компилятор памяти ОЗУ/ПЗУ; КМОП КНИ.

Разработана конструкторско-технологическая платформа проектирования (КТПП) цифровых, цифроаналоговых и аналоговых СБИС для отечественной КМОП КНИ-технологии 180 нм. КТПП обеспечивает гибкость проектирования за счет следующих компонентов [1–3]:

- комплект средств проектирования аналоговых и цифроаналоговых (в аналоговой части) СБИС (PDK);
- комплект средств проектирования цифровых и цифроаналоговых (в цифровой части) СБИС (DDK);
- компиляторы блоков памяти ОЗУ/ПЗУ;
- модели приборов в формате Spectre;
- средства обеспечения поддержки и корректной работы с САПР от ведущих EDA-компаний.

КТПП разработана под отечественную полупроводниковую технологию КМОП КНИ с характеристиками:

- минимальные проектные нормы — 180 нм;
- напряжение питания — 1,8/3,3/5,0 В ($\pm 10\%$);
- шесть уровней металлизации: 1–4 — Al-Cu-металлизация, шаг трассировки 0,32 мкм; уровни 5,6 — с шагом 0,64 мкм.

PDK содержит технологическую библиотеку базовых активных и пассивных элементов, файлы верификации DRC и LVS, файлы для экстракции (LPE), модели приборов в формате Spectre, технологический LEF-файл, скрипты автоматизации, правила проектирования топологии (DRM).

DDK содержит библиотеки цифровых элементов, интерфейсных элементов и компиляторы памяти.

Библиотеки разработаны в виде баз данных с комплектом файлов в форматах OA / CDL / GDSII / LEF / LPE / Liberty / CeltIC / Verilog и документацию.

Библиотеки цифровых элементов и элементов ввода-вывода реализованы в трех доменах питания — 1,8/3,3/5,0 В с преобразованием уровня между разными доменами. Компиляторы обеспечивают генерацию одно- и двухпортового ОЗУ и блоков ПЗУ. Максимальная емкость ОЗУ — 512 Кбит, ПЗУ — 1 Мбит.

Разработаны маршруты:

- финальной верификации топологии;
- входного контроля и подготовки проекта к изготовлению фотошаблонов и производству;
- генерации и верификации IBIS-моделей [4];
- генерации ОЗУ/ПЗУ с возможностью выбора блока по площади, быстродействию и т. д. [5];
- регенерации ПЗУ на основе новой зашивки [5];
- генерации и верификации библиотек средствами САПР и специализированного ПО [6].

Разработка КТПП СБИС на базе КМОП КНИ 180 нм дает возможность:

- применять отечественную элементную базу для создания СБИС широкого применения, функционирующих в условиях воздействия СВВФ;
- повысить устойчивость разработанных СБИС к воздействию СВВФ за счет возможностей технологии.

Проведен сравнительный анализ КТПП для технологий КМОП 180 нм / 6М и КМОП КНИ 180.

Для анализа конструктивно-технологических и схемотехнических решений, проверки работоспособности функциональных узлов и блоков, определения параметров элементной базы, а также элементов STD/IO библиотек и блоков памяти ОЗУ/ПЗУ был разработан, изготовлен и испытан специализированный тестовый кристалл. Результаты измерений ТК подтверждают работоспособность библиотек и блоков памяти ОЗУ (SP/DP) / ПЗУ разработанной КТПП.

Литература

1. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солодуха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 782 с. ISBN 978-5-94836-603-6.
2. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Надин А. С. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования радиационно стойких СБИС на базе отечественной технологии КМОП 90 нм на основе RHBD-методологии // Наноиндустрия, 2019. — № S (89). — С. 254–257. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.254.257.
3. Ильин С. А., Кочанов С. К., Ласточкин О. В. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Наноиндустрия, 2018. — № S (82). — С. 365–368. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368.
4. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Новиков А. А., Шипицин Д. С. Исследование и разработка IBIS-моделей для библиотек ячеек ввода-вывода // Международный форум «Микроэлектроника-2019», 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»: Сборник тезисов, Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 года. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — С. 312–314.

5. Ильин С. А., Ласточкин О. В., Новиков А. А., Шипицин Д. С. Семейство компиляторов радиационно стойких блоков памяти по технологиям КМОП/КНИ с технологическими нормами 180/90 нм // *Наноиндустрия*, 2022. — Т. 15. — № S8-1 (113). — С. 247–251. DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.247.251.
6. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Методика автоматизированной верификации и валидации в кремнии комплекта средств проектирования цифровых СБИС // *Наноиндустрия*, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 249–252. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.249.252.

УДК 004.4 + 621.382

Подсистема миграции иерархических СФ-блоков

Керре А. Л., Сотников М. А., к. т. н., Розенфельд В. П., Смирнов Ю. Г.*ООО «НМ-Тех»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,**этаж 1, помещение XII, офис 4,4а**info@nm-tech.org*

В работе представлено описание задач, возникающих при миграции топологических и схемотехнических представлений СФ-блоков, а также подходов к их решению. Рассмотрена реализация этих подходов в подсистеме миграции топологии, активно внедряемой в актуальные маршруты проектирования.

Ключевые слова: топология; миграция; сжатие; технологические ограничения; граф ограничений; коррекция нарушений; параметризованные ячейки.

Введение

Задача миграции возникает при переносе разработанных СФ-блоков на другой технологический процесс (например на отечественную фабрику). Спектр подзадач, возникающих при миграции топологии и схемы СФ-блоков, довольно широк. Рассмотрим основные проблемы и методы их решения.

Переход на целевые технологические слои

При переходе на другую технологию часто необходимо не просто перенести геометрические фигуры из одного слоя в другой, а модифицировать их. При отсутствии некоторого слоя в целевой технологии все фигуры в нем требуется удалить. Или, наоборот, необходимо создать новый слой на основе входных данных. Разработан механизм выполнения геометрических операций над исходными слоями (объединение, расширение, копирование и т. п.), учитывающий иерархию ячеек.

Масштабирование и округление координат

Техпроцессы могут различаться шагом технологической сетки, к которой должны быть привязаны координаты всех геометрических объектов. После масштабирования с учетом технологических норм необходимо привести топологию в новую сетку. Эта процедура должна сохранять размеры топологических объектов и не допускать появления разрывов проводников. Это решается на этапах начальной постановки в сетку и легализации.

Замена параметризованных ячеек

Параметризованные ячейки (ПЯ) являются частью комплекта средств проектирования и могут отличаться между двумя технологиями. При замене ПЯ необходимо установить основные параметры устройства для каждого экземпляра ячейки в соответствии с задачей миграции и подобрать остальные параметры, чтобы геометрия целевой ячейки соответствовала исходной. Для этого разработан алгоритм замены ПЯ на основе заданной пользователем таблицы преобразования параметров, включающей возможность использования формул. Эта же таблица используется и при миграции схемы СФ-блока.

Миграция топологии на основе графа ограничений

Как правило, замены слоев, масштабирования и замены ПЯ недостаточно для выполнения всех технологических норм целевой технологии. Применяется комплексный подход с использованием графа ограничений, позволяющий целенаправленно выполнить необходимые нормы. Классические алгоритмы легализации на основе графа ограничений [1–2] были модифицированы для поддержки иерархической топологии [3]. Добавлены определение порядка миграции ячеек, ограничения для сохранения иерархической связности, упрощение топологии нижнего уровня при переходе на верхний и т. п.

Кроме легализации, использование графа ограничений позволяет применять рекомендуемые правила для повышения выхода годных, сохранять связность при изменении технологической сетки и замене ПЯ [4], сохранять регулярность и симметрию топологии.

Миграция схемы

При миграции схемы СФ-блока приборы заменяются в соответствии с таблицей, заданной пользователем, используемой также и для замены ПЯ. Это позволяет сохранять соответствие схемы и топологии. Поскольку схемотехнические символы в целевой технологии могут геометрически отличаться от исходных, используется алгоритм преобразования схемы, сохраняющий электрическую связность.

Заключение

Разработанные подходы применены на практике для миграции реальных блоков (схем и топологий). Показаны преимущества, которые дает применение автоматизированной миграции при переходе на новый технологический процесс.

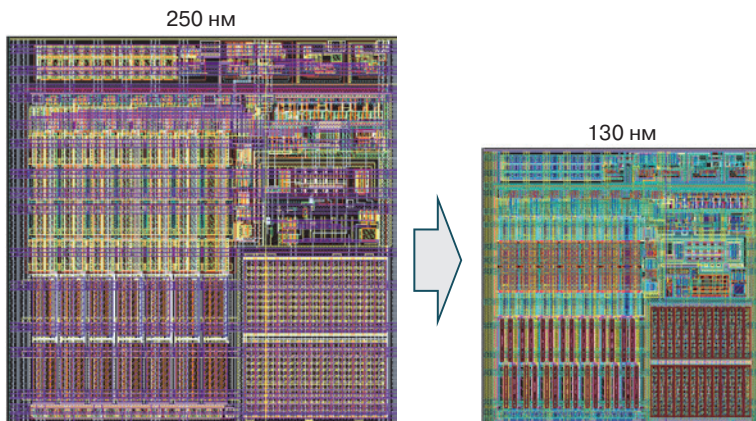


Рис. 1. Пример миграции блока

Литература

1. Sherwani N. Algorithm for VLSI Physical Design Automation // Second Edition. Kluwer Academic Publishers, 1995.

2. Розенфельд В. П., Сотников М. А., Топузов И. Г., Улуханов Э. А., Широ Е. Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2005.
3. Shaphir E., Pinter R. Y. and Wimer S. Cell-based interconnect migration by hierarchical optimization // Integration, the VLSI Journal, 47 (2), 2014.
4. Kerre A., Sotnikov M. Method of generating a target layout on the basis of a source layout. United States Patent, № US 9659132 B2, May 23, 2017.

УДК 621.3.011.7

Подход к автоматизированному синтезу схем и топологий СВЧ интегральных схем на примерах секций аттенюатора и фазовращателя

Сальников А. С., Добуш И. М., Горяинов А. Е., Калентьев А. А., Файль Т. Н.,
Билевич Д. В., Метель А. А.

*500ht Lab, Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники*

*634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
andrei.salnikov@main.tusur.ru*

В докладе представлен подход, позволяющий осуществлять синтезирование схемы и топологии СВЧ интегральной схемы. В качестве примера показан синтез секций ступенчатого аттенюатора и ступенчатого фазовращателя. Внедрение данного подхода в САПР позволяет значительно повысить производительность труда разработчика.

Ключевые слова: ступенчатый аттенюатор; ступенчатый фазовращатель; синтез топологии; синтез схемы; генетический алгоритм; СВЧ МИС.

Введение

Высокий спрос на СВЧ интегральные схемы требует повышения производительности труда разработчиков. Основным инструментом разработчика является САПР. Перспективным направлением развития САПР является внедрение методов автоматизированного синтеза [1–5]. В данном докладе будут рассмотрены подходы к синтезу схем и топологии СВЧ интегральных схем.

Синтез схемотехнического решения

Наиболее частые решения схем ступенчатого аттенюатора и ступенчатого фазовращателя представляют собой каскадное соединение от четырех до семи секций. Под секцией понимается совокупность коммутационных и пассивных элементов, обеспечивающих заданный уровень вносимого ослабления и фазового сдвига. Коммутационные элементы управляют состоянием секции (ослабление или опорное — для аттенюатора, малое и большое значение фазы — для фазовращателя). Основой создания методики синтеза схемных решений является формирование модели морфологического множества секций; основы подхода подробно описаны в работах [2, 3]. Результатом работы алгоритма является схема секции, удовлетворяющая заданным требованиям.

Синтез топологического решения

Схема и проектные нормы (минимальные зазоры между элементами и др.) являются входными данными для методики синтеза топологии. Целевая функция для топологии включает заданные неравенствами отсутствие пересечений элементов, минимальную длину соединительных линий, минимальное число изгибов и мостов в линиях.

На первом этапе выполняется размещение элементов. Первое приближение получается из анализа графа схемы. Глобальное размещение выполняется с помощью генетического алгоритма. Для детального размещения используется алгоритм имитации отжига с эффектом памяти. После размещения выполняется трассировка

с использованием алгоритма А*. Готовая топология передается в САПР для электродинамического моделирования.

Для проверки предложенного подхода были синтезированы схемы и топологии двух интегральных схем: 2-дБ секции ступенчатого аттенюатора диапазона 0,5–20 ГГц и 90° секции фазовращателя диапазона 9–11 ГГц. Целевой технологией в эксперименте была 0,25 мкм GaAs pHEMT АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург).

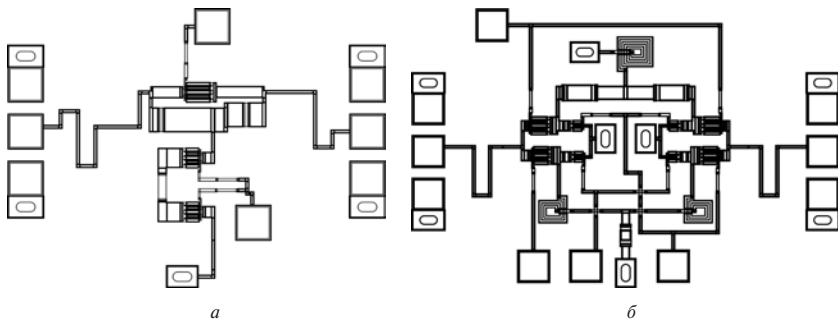


Рис. 1. Синтезированная топология секции аттенюатора (а) и секции фазовращателя (б)

Синтез топологии занимает около трех часов. Электрические характеристики полученных решений находятся в пределах заданных требований.

Заключение

В данном докладе представлен подход к синтезу схемного решения и топологии СВЧ интегральной схемы. Предложенные методики позволяют выполнить сквозное проектирование СВЧ-схемы от постановки требований до синтеза фотошаблона в режиме автоматизированного синтеза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10036, <https://rscf.ru/project/22-79-41023>

Литература

1. Vye D. Network Synthesis Wizard Automates Interactive Matching Circuit Design // Microwave Journal, 2018. Vol. 61. № 11. P. 96–102.
2. Kalentyev A. A., Babak L. I., Garays D. V. Genetic-algorithm-based synthesis of low-noise amplifiers with automatic selection of active elements and DC biases // 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. IEEE, 2014. P. 520–523.
3. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2011. — № 2–2 (24). — С. 204–211.
4. Zebulum R. S., Pacheco M. A., Vellasco M. M. Evolutionary electronics: automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms. CRC press, 2018. 304 p.
5. Koza J. R. et al. Evolutionary design of analog electrical circuits using genetic programming // Adaptive Computing in Design and Manufacture: The Integration of Evolutionary and Adaptive Computing Technologies with Product/System Design and Realisation. Springer London, 1998. P. 177–192.

УДК 004.4 + 621.382

Подсистема автоматизированного синтеза квалификационных ячеек для аттестации правил физической верификации топологии ИС

Розенфельд В. П., Смирнов Ю. Г., Керре А. Л., Сотников М. А., к. т. н.

ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,

этаж 1, помещение XII, офис 4,4а

info@nm-tech.org

Предложен метод синтеза квалификационных ячеек (КЯ) с использованием графового подхода, позволяющий для заданного правила создавать корректные и некорректные фрагменты топологии с последующим их объединением в КЯ. Рассмотрена программная реализация и приведены оценки эффективности метода.

Ключевые слова: квалификационная ячейка; топология; фрагмент; верификация; технологические ограничения; граф ограничений; коррекция нарушений.

Введение

При разработке комплектов средств проектирования (ПДК) необходимо формально подтвердить корректность инструментов физической верификации топологии: они должны определять места нарушений конструктивно-технологических ограничений (КТО, правила) и не должны выдавать «ложных» сообщений об ошибках. Для этого служат квалификационные ячейки (КЯ), пример одной из которых приведен на рис. 1. КЯ разрабатываются для каждого КТО отдельно и содержат как корректные фрагменты топологии (рис. 1 слева), так и нарушения заданного правила (рис. 1 справа). Ячейка должна обеспечивать покрытие различных топологических ситуаций — «сторона — сторона», «точка — точка» и «точка — сторона» (некоторые из них приведены на рис. 1).

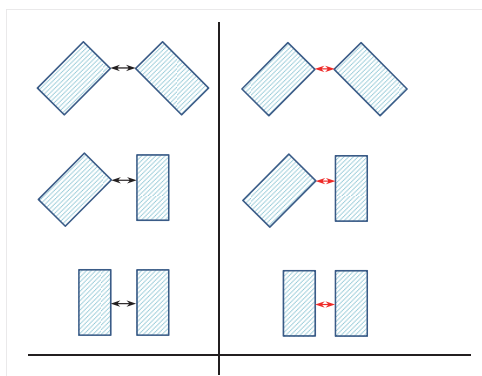


Рис. 1. Пример топологии КЯ для правила минимального зазора

При наличии в техпроцессе сложных ограничений разработка библиотек КЯ и их модификация в случае изменения правил могут занимать до нескольких месяцев. Авторами предложен способ создания КЯ с использованием модификации топологии на основе графового подхода [1, 2].

Способ получения корректных и некорректных фрагментов КЯ

Для изменения топологии с соблюдением КТО применяется графо-теоретический подход [1]. В работе [2] описана модель топологии, в которой фрагмент представляется множеством непересекающихся многосвязных контуров (полигонов) и в графе ограничений каждая вершина соответствует одной стороне контура, а ребро — ограничению между парой сторон в виде неравенства

$$x_i - x_j \geq d, \tag{1}$$

где x_i и x_j — координаты сторон полигонов, d — минимально допустимое расстояние между ними.

Заготовка — вариант топологии, из которого будут автоматически созданы один или несколько фрагментов КЯ для заданного правила. С помощью процедур-генераторов можно создавать заготовки как для базовых правил (зазора, ширины, нависания), так и для сложных правил с условиями. Также может использоваться маршрут получения фрагментов топологии из пользовательской заготовки.

Для получения отдельного фрагмента КЯ из заготовки предложен метод, содержащий следующие шаги:

1. Создание комбинации выполненных и нарушенных условий правила.
2. Добавление этих условий в граф ограничений.
3. Коррекция топологии фрагмента с учетом графа с использованием модели и алгоритмов на основе [2, 3].

Метод проиллюстрирован на рис. 2. Технологическое правило можно выполнить и нарушить несколькими способами, как показано в верхнем и нижнем рядах соответственно.

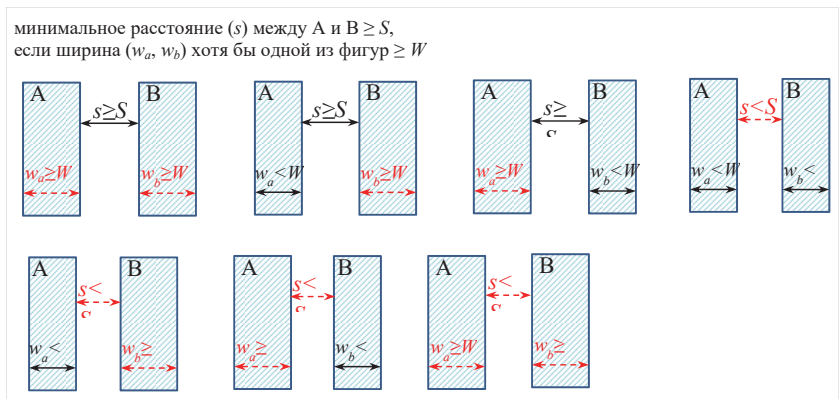


Рис. 2. Варианты выполнения (сверху) и нарушения (снизу) правила минимального расстояния, зависящего от ширины фигур

Перебор комбинаций условий используется для получения всех фрагментов на рис. 2.

Метод миграции и сжатия топологии [3] использовался при создании библиотек стандартных ячеек и миграции топологии блоков и позволяет учитывать практически все типы ограничений, присутствующие в современных техпроцессах. Он применим для автоматического (с помощью генераторов заготовок) или автоматизированного (модификацией заготовок от пользователя) синтеза топологии КЯ для подавляющего большинства типов правил из процессов, применяемых на отечественных фабриках.

Заключение

В докладе предложен метод синтеза КЯ с использованием коррекции топологии на основе графо-теоретического подхода, что позволяет сократить время разработки библиотек КЯ и комплектов средств проектирования, а также улучшить качество средств верификации топологии за счет их тщательной проверки.

Литература

1. Sherwani N. Algorithm for VLSI Physical Desigh Automation / Second Edition. Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 423.
2. Марченко М. А., Плис А. П., Сотников М. А. Контурная модель топологии ячейки СБИС для задачи сжатия // Тр. НИИР, 2000. — С. 73–75.
3. Розенфельд В. П., Сотников М. А., Топузов И. Г., Улуханов Э. А., Широ Е. Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2005. — С. 121–127.

УДК 004.312:004.21

Оптимизация синтеза самосинхронных схем

Плеханов Л. П.

*Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
lplekhanov@inbox.ru*

Самосинхронные схемы, обладающие уникальными свойствами, строятся по специальным принципам, отличным от других типов схем. В статье приводятся способы оптимизации синтеза, специфические только для самосинхронных схем.

Ключевые слова: самосинхронные схемы; синтез самосинхронных схем; оптимизация.

Введение

Самосинхронные (СС) схемы обладают уникальными свойствами: полное отсутствие гонок, отказобезопасность, безошибочная работа в максимально широких пределах внешних условий (температуры и напряжения питания) и некоторые другие.

Обеспечение этих свойств требует дополнительных затрат в транзисторах по сравнению с обычными схемами, а также циклической работы СС-схем. В СС-схемах отсутствуют любые тактовые генераторы, а элементы переключаются не принудительно, а по собственным задержкам.

Существующие практические методологии приводят к неоправданно большим затратам в транзисторах по сравнению с ручным проектированием. Какая-либо оптимизация в них отсутствует.

Главной проблемой создания СС-схем является сокращение затрат при приемлемых временных показателях. Полного изложения приемов практического оптимального синтеза в литературе не существует. Поэтому тема доклада является актуальной.

Данная статья является развитием и продолжением статьи [1].

Исходными данными будет описание несамосинхронной схемы любого уровня (арифметического, логического, поведенческого) и любой глубины иерархии.

Главным критерием считается минимизация затрат в транзисторах. Другие критерии — быстродействие и минимизация количества сигналов. Рассматриваются схемы, изготовляемые по КМДП-технологии.

Способы оптимального синтеза СС-схем

На предварительном этапе используется система открытого доступа Yosys на языке Verilog [2], оказавшаяся наиболее удобной при переходе от описания верхнего уровня к функциональному.

В библиотеке элементов желательно иметь специально разработанные для СС-схем простые логические элементы [3], триггеры и регистры.

Для комбинационных фрагментов рассмотрены следующие способы:

- укрупнение исходных функций для уменьшения затрат на индикацию,
- согласование спейсеров при соединении СС-элементов,
- разбиение схемы на ярусы (каскады) и секции.

За счет коллективной работы секций в составе ярусов существует возможность сокращения затрат на индикацию секции. С этой целью применяются теоретические методы: табличный [4] и функциональный [5].

Оптимизация индикации состоит в совмещении во времени информационных вычислений и процессов индикации. При этом выявлено, какие индикаторные гистерезисные триггеры наиболее подходят для оптимизации.

Заключение

Самосинхронные схемы обладают уникальными свойствами и строятся по специальным принципам.

Одной из главных задач синтеза СС-схем является сокращение затрат в транзисторах. В докладе излагаются способы оптимизации синтеза, специфические только для СС-схем.

Литература

1. Плеханов Л. П., Денисов А. Н., Дьяченко Ю. Г., Мамонов Д. И., Морозов Н. В., Степченко Д. Ю. Реализация синтеза самосинхронных схем в базе БМК // Наноиндустрия, 2022. — М.: ТЕХНОСФЕРА. — Спецвыпуск, Т. 15. — № S8–1 (113). — С. 274–282.
2. Yosys Open Synthesis Suite. URL: <http://www.clifford.at/yosys/download.html> (дата последнего обращения 03.08.2023).
3. Плеханов Л. П. Оптимизация состава библиотеки элементов для синтеза самосинхронных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), 2022. — Вып. 4. — С. 15–20.
4. Плеханов Л. П. Основы самосинхронных электронных схем. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 208 с.
5. Плеханов Л. П. Синтез самосинхронных комбинационных секций функциональным методом // Системы и средства информатики. — Т. 27. — № 2. — М.: Наука, 2017. — С. 85–97.

УДК 621.3.049.77, 004.415.2

Применение открытых IP-ядер для построения СнК с Linux

Елизаров С. Г., Лукьянченко Г. А., Михайлов Д. В., Монахов А. М.*ООО «Мальт Систем»**119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1**info@maltssystem.com*

В докладе рассмотрен опыт построения многоядерной СнК с поддержкой ОС Linux на базе открытых RISC-V процессорных ядер. Также будет освещен опыт использования открытых библиотек для построения накристалльных сетей, контроллеров памяти и организации DMA для подключения блоков собственной разработки.

Ключевые слова: проектирование цифровых микросхем; открытое программное обеспечение; СБИС; RISC-V; AXI; открытые СФ-блоки.

В последние годы параллельно с развитием программного обеспечения (ПО) с открытым программным кодом для проектирования на СБИС и ПЛИС растет количество проектов открытых сложнотранспортных (СФ, IP) блоков [1]. Спектр СФ-блоков с открытым кодом на настоящий момент уже крайне широк и позволяет построить из них полнофункциональную систему на кристалле (СнК) с поддержкой ОС Linux, подходящую для имплементации как в ПЛИС, так и в СБИС. В данной работе мы рассмотрим наш опыт построения такой СнК на основе 64-разрядного процессорного ядра Rocket с открытой системой команд RISC-V [2].

Частой целью разработки СнК является необходимость выполнения наряду с классическими задачами управления, для которых хорошо подходят процессоры общего назначения, специализированных задач, например обработки сетевого трафика, криптографии и др. Для этого в СнК помимо процессорных ядер общего назначения добавляют специализированные под задачу ускорители (СФ-блоки для обработки сетевых пакетов, криптографические сопроцессоры и др.). При этом, поскольку вычислительные задачи выполняются на ускорителях, требования к производительности ядер общего назначения предъявляются умеренные, на первое место выходят стоимость и удобство интеграции, а также удобство программирования и отладки. Это делает привлекательным применение с этой целью открытых процессорных ядер с поддержкой Linux. На рис. 1 представлена структурная схема разрабатываемой в нашей компании СнК на основе процессорного ядра Rocket, его базовой периферии, сгенерированной при помощи СнК-генератора RocketChip [3] и других открытых СФ-блоков.

Проектируемая СнК содержит SMP-кластер из процессорных ядер Rocket с производительностью 2.3 Coremark/МГц и кешами L1, инклюзивный L2-кеш, подсистему динамической памяти на основе проекта LiteDRAM [4], контроллеры Ethernet на основе СФ-блоков из проекта Verilog Ethernet Components [5], разработанных под задачу специализированных ускорителей и шинной инфраструктуры AXI4 с DMA на основе СФ-блоков из проекта PULP [6]. Таким образом, за исключением ускорителей и физического уровня контроллера динамической памяти, СнК состоит из блоков с открытым исходным кодом. Благодаря этому SDK для такой СнК в значительной степени также состоит из компонентов с открытым

программным кодом, свободно доступных в репозиториях RocketChip, и других использованных проектов.

На настоящий момент разрабатываемая СнК успешно прошла тестирование в ПЛИС (частоты до 100 МГц) и имплементацию на СБИС (до 1 ГГц), что доказывает возможность и перспективность подхода к разработке СнК с применением открытых СФ-блоков.

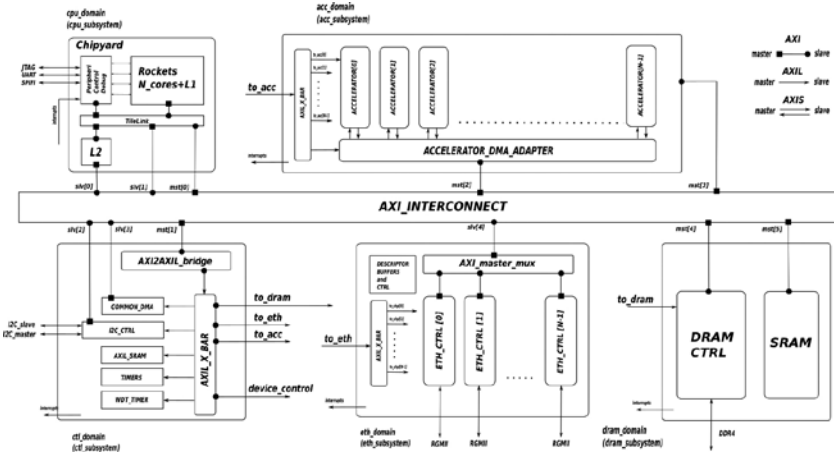


Рис. 1. Схема проектируемой СнК на основе СФ-блоков с открытым исходным кодом

Литература

1. Елизаров С. Г. Перспективы использования open-source ПО и IP для разработки микросхем // Конференция «Микроэлектроника-2022».
2. RISC-V Specifications [Электронный ресурс]. — URL: <https://riscv.org/technical/specifications>.
3. Rocket Chip Generator [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/chip-salliance/rocket-chip>.
4. LiteDRAM [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/enjoy-digital/lite-dram>.
5. Verilog Ethernet Components [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/alexforenich/verilog-ethernet>.
6. AXI SystemVerilog Modules for High-Performance On-Chip Communication [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/pulp-platform/axi>.

УДК 621.3.049.77

Практические аспекты IR Drop-анализа для СБИС уровня 28 нм

**Забабурин А. Ю., Савин С. В., Титов А. И., Чекмазов П. Ю.,
Шипицин Д. С., к. ф. -м. н.**

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Дано представление о процессе проектирования тестового кристалла (ТК) на базе технологии КМОП 28 нм; о применении IR Drop/Ground Bounce-анализа и создании структур напряжения питания (Vdd)/«земли» (Vss); о процедурах повышения точности моделирования и анализе измерений частот кольцевых генераторов (КГ).

Ключевые слова: КМОП; IR Drop-анализ; Ground Bounce-анализ; LDE.

Введение

На этапах проектирования КМОП СБИС важно использовать весь широкий спектр методик аттестации структур «питание»/«земля»: от применения IR Drop/Ground Bounce-анализа, генерации Power Grid-представления цифровых библиотек до учета влияния эффекта близости в топологических структурах.

Выполнение этих процедур предотвратит потенциальную возможность возникновения «узких» мест, ускорит процесс создания и в конечном счете повысит качество изделия.

IR Drop / Ground Bounce-анализ

В процессе проектирования ТК на этапах физического синтеза особое внимание уделялось процессу генерации Vdd/Vss-структур, поскольку от грамотного формирования структуры глобальных шин «питание»/«земля» зависят финальные характеристики изделия, такие как быстродействие и потребляемая мощность [1].

После выпуска образцов ТК проводилось сравнение характеристик реального изделия и результатов его предварительного моделирования.

На первом этапе исследований выполнялось сравнение результатов моделирования при номинальных значениях Vdd = 0,9 В и было замечено несоответствие, поскольку рабочая частота КГ на измерениях оказалась ниже ожидаемой.

Тогда на втором этапе исследований был проведен анализ распределения значений Vdd по всем структурам для различных слоев металлизации (IR Drop).

Из полученных результатов стало ясно, что мощность потребления исследуемого блока КГ практически равна 0 и все падение напряжения происходит только на RC-компонентах цепи Vdd. То есть условия моделирования с учетом полученных результатов распределения значений Vdd по-прежнему являются слишком оптимистичными, хотя и приблизились к реальным.

Поэтому на третьем этапе исследований для стандартных цифровых ячеек и функциональных блоков проекта была использована концепция Power Grid-библиотек (.cl-представление), основанная на применении как векторного анализа, так и абстрактного коэффициента переключения [2].

Полученные результаты стали еще ближе к значениям частот, полученным на измерениях, что означало необходимость дальнейшего приближения условий моделирования к реальным.

В итоге на четвертом этапе исследований проводился анализ распределения значений Vss по всем структурам для различных слоев металлизации (Ground Bounce).

Для еще более точного анализа на пятом этапе были сформированы и применялись элементы библиотеки стандартных ячеек, учитывающие эффект близости (LDE) [4], что дало ощутимый положительный результат.

По результатам применения более точных методик для моделирования полученные результаты стали максимально соответствовать реальным.

Такая модификация маршрута проектирования в сторону усложнения в итоге подтверждает правильность выбранной методологии моделирования, поскольку основывается на реальных характеристиках изделия.

Заключение

В процессе проектирования и тестирования СБИС уровня 28 нм важно применять все доступные методики формирования и валидации структур «питание»/«земля» [3], поскольку это значительно облегчит идентификацию и устранение потенциально критических мест на ранних этапах маршрута проектирования, что в конечном итоге будет способствовать более качественному уровню выпускаемых изделий.

Литература

1. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солодуха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 782 с. ISBN 978-5-94836-603-6.
2. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Методика автоматизированной верификации и валидации в кремнии комплекта средств проектирования цифровых СБИС // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № 9–1 (119). — С. 249–252. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.249.252.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Новиков А. А., Шипицин Д. С. Методика валидации в кремнии библиотек стандартных цифровых элементов. DOI: 10.31114.2078-7707-2020-4-140-145.
4. Tehranipoor M., Peng Ke, Chakrabarty K. Test and Diagnosis for Small-Delay Defects. ISBN 978-1-4419-8296-4. DOI: 10.1007/978-1-4419-8297-1.

УДК 621.382.323: 536.48

Оценка средствами TCAD стойкости ячеек памяти СОЗУ к воздействию ОЯЧ при уменьшении проектных норм до 28 нм

**Петросянц К. О.¹, Харитонов И. А.¹, Силкин Д. С.¹, Попов Д. А.¹,
Исмаил-Заде М. Р.¹, Переверзев Л. Е.², Морозов А. А.², Тургенев П. В.²,
Шпицин Д. С.³, Ласточкин О. В.³**

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)*

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

² *ООО «Альфачип»*

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 8

³ *АО «НИИМЭ»*

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

С использованием средств смешанного TCAD-SPICE-моделирования для КМОП-ячеек статической памяти, изготовленных по проектным нормам от 90 до 28 нм, проведена настройка и калибровка программных средств и даны количественные оценки характеристик стойкости КМОП статической памяти к воздействию ОЯЧ для указанных выше проектных норм. Результаты моделирования подтверждены результатами испытаний.

Ключевые слова: статическая память; ячейка памяти; удар частицы; LET; сбой; критический заряд; TCAD; SPICE; моделирование.

Известно, что стойкость ячеек статической памяти к воздействию тяжелых заряженных частиц зависит от используемых при производстве проектных норм и конструктивно-технологических особенностей ячеек. Применение средств моделирования позволяет оценивать влияние конструктивно-технологических и схематических решений ячеек памяти на их стойкость, проводить оптимизацию этих решений по критериям стойкости, уменьшая количество дорогостоящих испытаний схем памяти на моделирующих установках.

Работы по оценке стойкости ячеек памяти СОЗУ к воздействию ОЯЧ состояли из следующих шагов:

- настройка TCAD-модели структуры МОПТ для требуемых проектных норм по данным производителей или по обобщенным литературным данным;
- верификация SPICE-моделей МОПТ-ячейки для требуемых проектных норм по данным производителей или по обобщенным литературным данным;
- верификация TCAD-SPICE-моделирования по воздействию ОЯЧ на ячейку памяти СОЗУ, используя результаты испытаний для проектных норм 90 нм;
- оценка стойкости ячеек статической памяти к воздействию тяжелых заряженных частиц при уменьшении проектных норм;
- анализ полученных результатов.

Описаны проведенные работы по оценке стойкости ячеек памяти СОЗУ к воздействию ОЯЧ, включая результаты TCAD- и SPICE-моделирования и испытаний.

Статья подготовлена в ходе реализации стратегического проекта «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность» программы развития национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» в рамках участия в программе Минобрнауки России «Приоритет-2030» национального проекта «Наука и университеты».

УДК 621.382

Поддержка в PDK инструментария для разработки СВЧ ИС в стандартной КМОП-технологии**Загидуллина О. Р.^{1,2}, Надин А. С.², Кириллов М. А.², Шипицин Д. С.², к. ф.-м. н.**¹ ООО «НИИМЭ-МД»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
ozagidullina@niime.ru² АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
anadin@niime.ru, mikirillov@niime.ru, dshipitsin@niime.ru

В данной работе предложено решение по поддержке средствами проектирования (далее PDK) инструментария разработки СВЧ ИС для стандартной отечественной полупроводниковой низкопотребляющей КМОП-технологии уровня 90 нм [1] в единой среде проектирования ИС.

Ключевые слова: PDK; PCell; электромагнитный анализ; СВЧ; КМОП; микрополосок.

Введение

Радиочастотные ИС в КМОП-технологиях набирают все большую популярность в мире. Это связано со стремительным развитием беспроводных систем и сетей для коммерческого и специального применения. Для разработки таких ИС требуется характеризованная элементная база в расширенном частотном диапазоне, а также поддержка специализированной элементной базы PDK [2].

Расширенный инструментарий средств проектирования

Для проектирования заказных СВЧ ИС PDK предложено расширить дополнительную специализированную элементную базу, состоящей из:

- набора катушек индуктивностей различных конфигураций и параметров;
- микрополосковых линий (Т-образные, линейные, угловые) для формирования линии передач;
- СВЧ-транзисторов (многопальцевые структуры фиксированных конфигураций);
- варакторов.

Для автоматизации процесса проектирования линий передач в топологии необходимо разработать и интегрировать параметризируемые топологические представления PCell для микрополосковых линий.

Для проведения комплексного моделирования СВЧ ИС в схематехнической среде Virtuoso необходимы SPICE-модели элементной базы, которые могут быть описаны с использованием S-параметров.

Всю элементную базу PDK необходимо характеризовать в широком диапазоне частот от 500 МГц до 40 Гц с учетом в моделях низкочастотных шумов вида 1/f.

Также частью единой платформы проектирования PDK для СВЧ ИС должна являться реализация поддержки и интеграция электромагнитного симулятора. Это позволит исключить или минимизировать необходимость трансляции данных

между разными средами проектирования, тем самым минимизируя потенциальные риски, влияющие на качество реализации проекта.

Заключение

В результате проведенной работы группой разработчиков предложена и реализована концепция PDK с расширенным инструментарием для разработки СВЧ ИС в рамках стандартной отечественной полупроводниковой низкопотребляющей КМОП-технологии 90 нм.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Ильин С. А., Кочанов С. К., Ласточкин О. В. и др. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Наноиндустрия, 2018. — № 5 (82). — С. 365–368. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.365.368. EDN XQVMYN.

УДК 621.3.049.774.004.94

Особенности моделирования интегральных схем модуляции и демодуляции с мемристорными приборами

Русаков С. Г., Ульянов С. Л.

*Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

Обсуждаются задачи схемотехнического моделирования, связанные с особенностями применения мемристорных приборов в разработках схем модуляции и демодуляции.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование; многопериодные режимы; мемристорные приборы; модуляторы и демодуляторы на мемристорах.

Свойство энергонезависимости делает мемристорные приборы привлекательными для применения в самых разных схемотехнических разработках. Приоритетными остаются разработки систем памяти, логических схем и нейросетей на базе мемристорной схемотехники. Относительно новыми стали исследования в области применения мемристорных приборов в радиотехнических интегральных схемах, схемах модуляции и демодуляции. Для таких схем оказывается возможным использование уникальных свойств мемристоров изменять мемристорное сопротивление под влиянием амплитуды, частоты и фазы входного периодического сигнала. Свойство может быть использовано, в частности, для конструирования полностью пассивных схем модуляторов и демодуляторов относительно простой конфигурации (см., например, [1–3]). Такие схемы хорошо подходят для применений со сверхнизким энергопотреблением, например для биомедицинских приложений. При бинарном представлении информационные уровни определяются фактически высоким и низким уровнями мемристорного сопротивления.

В работе выполнен анализ особенностей применения схемных симуляторов для цепей с модуляторами и демодуляторами на базе мемристоров, в частности учет влияния начального значения мемристорного сопротивления на результаты моделирования.

Приведены примеры моделирования схем амплитудной, частотной и фазовой модуляции на базе мемристорных приборов. Выполнено сравнение результатов моделирования для разных типов моделей мемристоров. В качестве задач моделирования обсуждаются оценка смещения среднего значения мемристорного сопротивления при периодическом воздействии, оценка допустимого диапазона изменения входной амплитуды для заданной частоты.

Литература

1. Göknaar I. C., Öncül F., Minayi E. New Memristor Applications: AM, ASK, FSK, and BPSK Modulators // *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2013. Vol. 55. P. 304–313.
2. Elashkar N. E., Aboudina M., Fahmy H. A. H. et al. Memristor based BPSK and QPSK demodulators with nonlinear dopant drift model // *Microelectronics Journal*, 2016. Vol. 56. P. 17–24.
3. Gao R., Shen Y. BPSK Circuit Based on SDC Memristor // *Micromachines*, 2022. Vol. 13. № 8. P. 1306.



УДК 621.3.049.774.004.94

Вычислительная процедура моделирования многопериодных режимов в нелинейных цепях с мемристорными приборами

Русаков С. Г., Ульянов С. Л.

*Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

Обсуждаются вычислительные особенности применения процедуры расчета установившихся периодических процессов при анализе схем с мемристорными приборами. Предлагается модификация итеративной процедуры, позволяющая улучшить вычислительные свойства при моделировании периодических режимов благодаря учету характеристик мемристов.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование; многопериодные режимы; установившийся периодический режим; мемристоры.

Благодаря своим свойствам мемристоры находят все более широкое применение в схемотехнических разработках самого различного типа. В первую очередь перспектива их применения определяется тем, что мемристоры являются энергонезависимыми компонентами.

Желательно, чтобы расширение области приложений поддерживалось средствами моделирования. Возникает естественный вопрос о применимости стандартных вычислительных процедур моделирования и схемных симуляторов на их основе для анализа цепей с мемристорными приборами. Вычислительные проблемы в этом случае связаны с дополнительным модельным дифференциальным уравнением (ДУ) для внутреннего состояния прибора. Требуется учет влияния на вычислительные процессы начальных условий переменной внутреннего состояния и сжимающегося гистерезиса в модели прибора.

Разработан целый ряд моделей мемристорных приборов, позволяющих формально ввести новое ДУ в состав модельных уравнений анализируемых цепей в виде электрических эквивалентов. Результатом является возможность применения распространенных схемных симуляторов без изменения базовых алгоритмов, включая формирование моделей и численное решение модельных уравнений.

Открытым остается вопрос, является ли такой подход полностью универсальным и может ли он быть распространен на все виды моделирования, которые предлагают современные схемные симуляторы.

В докладе обсуждается возможность применения специализированной процедуры моделирования установившихся периодических режимов во временной области. Такая процедура во многих случаях обеспечивает значительное ускорение моделирования периодических режимов в сравнении с расчетом полной временной диаграммы.

Распространенным вычислительным методом для такой процедуры является метод сведения краевой задачи к задаче Коши («метод пристрелки»). Метод приводит к решению системы нелинейных уравнений относительно вектора начальных условий $x(0)$, причем на каждом шаге итерационного процесса вектор $x(T)$ (T -период) находится решением задачи Коши с соответствующими начальными условиями. Такой подход хорошо согласуется с программами схемотехнического моделирования, поскольку позволяет использовать отработанные для задач

электрического моделирования стандартные методы интегрирования. В качестве итерационного метода решения системы нелинейных уравнений относительно вектора начальных условий $x(0)$ обычно применяются итерации ньютоновского типа с решением на шаге итерации системы линейных уравнений для вычисления поправки $\Delta x(0)^{(k)}$. Процедура ориентирована на случай одного периодического решения исходной задачи, и, соответственно, система нелинейных уравнений имеет единственное решение $x(0)$. Здесь период T фиксирован и определяется периодом внешнего источника.

Эти условия нарушаются при включении мемристорных моделей. В частности, в зависимости от выбора начальных условий переменной внутреннего состояния мемристора могут быть получены разные периодические решения.

В работе предлагается модификация итеративной схемы, назначение которой — снять ограничения, связанные с вычислительными проблемами исходной итеративной процедуры при моделировании цепей с мемристорными приборами.

Приведены примеры моделирования, подтверждающие работоспособность разработанной вычислительной схемы.

УДК 621.3.049.77

Использование компилированных математических выражений на основе лямбда-функций для вычисления значений параметров элементной базы PDK

Тюрин А. В., Надин А. С., Кириллов М. А., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.
АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
atyurin@niime.ru

В работе представлена технология преобразования параметров элементов библиотеки PDK, описывающихся как алгебраически, так и более сложными функциональными взаимоотношениями, во множество прекомпилированных анонимных (лямбда) функций с последующим вычислением как в числовом, так и в строковом виде.

Ключевые слова: PDK; Callback; Lambda functions.

Современные САПР предоставляют широкий набор инструментов для облегчения разработки проектов. Процесс разработки микроэлектронных аналоговых блоков, как правило, осуществляется в ручном или полуручном режиме методом подбора параметров активных и пассивных элементов, для каждого из которых пишется специальная модель и описываются взаимодействия между параметрами. Получение нужных выходных значений может быть достаточно трудоемкой задачей, и для ее ускорения САПР предоставляют инструменты параметрического и статистического анализа или автоматической оптимизации [1]. Во многих САПР предоставляется возможность вызова программного кода (callback или далее колбеки) при изменении значения параметра элемента, который вычисляет другие параметры в соответствии с правилами, описанными в модели. При этом результат может быть как в числовом, так и в параметрическом виде. Однако с уменьшением топологических норм возрастает влияние одних параметров элемента на другие в моделях, усложняются формулы расчета паразитных и LDE-эффектов [2] и модельные файлы становятся значительными по объему (а в некотором случае параметры вообще становится затруднительно описать алгебраическими выражениями). При этом написание отдельного колбека для каждого параметра становится значительно трудозатратным. Поэтому возникает задача создания более универсального функционала.

Нами предложена концепция, заключающаяся в преобразовании параметрического выражения в виде множества анонимных (лямбда) функций [3] и взаимодействий между ними. Лямбда-функции присутствуют практически во всех языках программирования и поддерживаются как в коммерческих САПР, так и в OpenSource-проектах. Для реализации метода все параметры были преобразованы к каноническому виду в виде строковой функционально-алгебраической последовательности. Каждая строка затем разбивается на массив иерархических токенов, содержащих либо одну функцию, либо фрагмент выражения, разделенный скобками или иными блоками, обладающими наивысшим приоритетом при вычислении. Например, выражение (1) будет преобразовано в массив выражений (2):

$$c = f(k, p) \cdot l \cdot (w - dw), \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} c = c_1 \cdot l \cdot c_2 \\ c_1 = f(k, p) \\ c_2 = w - dw \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Далее каждый токен компилируется в лямбда-функции, указатели на которые будут использованы в качестве входящих аргументов параметров иерархией выше. Таким образом, массив будет преобразован в виде

$$\begin{bmatrix} c = \text{lambda}(args)\{\text{return } MULT(c_1(args), args[l], c_2(args))\} \\ c_1 = \text{lambda}(args)\{\text{return } f(args[k], args[p])\} \\ c_2 = \text{lambda}(args)\{\text{return } MINUS(args[w], args[dw])\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Преимущества данного подхода:

- 1) лямбда-функции при инициализации компилируются системой, что экономит вычислительные мощности при их дальнейшем использовании;
- 2) отсутствие необходимости выстраивать иерархию вычисления параметров. Функции вызываются автоматически, когда это необходимо;
- 3) расширяемость функционала. Все формулы для параметров можно собирать в отдельном файле для удобства их редактирования, а пользовательские функции добавлять простой инициализацией.

Данная методология успешно реализована и используется в колбеках элементной базы ПДК, разрабатываемых в АО «НИИМЭ» в рамках заделных работ по программе импортозамещения.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Надин А. С., Тюрин А. В., Шипицин Д. С. Система предварительного расчета рабочих точек транзисторов с целью оптимизации конфигурации и учета влияния LDE параметров для технологии КМОП 28 нм // Форум «Микроэлектроника-2021».
3. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Anonymous_function [15.07.2023].

УДК 004.4

Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ

Верник П. А.¹, Власов С. Е.², Аряшев С. И.²

¹ АНО «Институт стратегий развития»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
Center@isd.center

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

Обосновывается актуальность и приводятся результаты работ по созданию компонентов отечественных САПР для маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ, в том числе системы управления жизненным циклом и средств обеспечения доверенности при производстве СБИС на недоверенных фабриках.

Ключевые слова: доверенная ЭКБ; контролируемое проектирование; САПР; управление жизненным циклом.

Правительством России предпринимаются необходимые меры, направленные на развитие отечественной электронной промышленности; национальные проекты, которые должны быть реализованы с опорой на отечественную продукцию, представляют собой уникальную возможность для интенсивного развития российской электроники. Для электронной промышленности открывается новый рынок специальной ЭКБ для доверенных аппаратно-программных платформ, предназначенных для стратегических объектов и систем цифрового управления критически важной инфраструктурой [1]. Это связано, с одной стороны, с возрастающей ролью цифровизации и реализацией планов по построению цифровой экономики, а с другой — с необходимостью обеспечения бесперебойности работы таких систем и их защиты от внешних атак.

Однако сохраняется ряд нерешенных задач, препятствующих созданию доверенной ЭКБ для критической инфраструктуры. Среди них — полная зависимость от импортных САПР ЭКБ из-за отсутствия отечественных разработок и отсутствие производственных мощностей, обладающих технологиями, отвечающими современным требованиям производства ИС [2].

Актуальной является задача создания отечественных средств проектирования и управления проектами по разработке доверенной ЭКБ, а также инструментов обеспечения доверенности с учетом производства кристаллов на недоверенных фабриках [3].

Разработка СБИС является сложным процессом, включающим множество итерационно повторяющихся обменов данными между отдельными инструментами, базами данных и системами. Оптимизация этого процесса может быть достигнута применением системы управления жизненным циклом ЭКБ, что позволит также сократить в разы время вывода изделий на рынок.

В 2021–2023 гг. в рамках государственных мер поддержки отечественных разработчиков средств производства электроники АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» и НИЦ «Курчатовский институт» — ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН был создан и в настоящее время проходит испытания опытный образец системы доверенного

проектирования, построенной на основе собственных оригинальных решений. Основными компонентами данной системы являются:

- система управления проектами и жизненным циклом изделий ЭКБ контролируемого маршрута «путь кристалла»;
- электронная база данных доверенных библиотек элементов и СФ-блоков БД СФБ;
- программный комплекс подготовки КД СБИС, верификации топологии и электрической принципиальной схемы СБИС, сборки проектов для мультизапусков ПК MPW;
- система поддержки маршрута контролируемого проектирования для испытаний и сертификации готовых СБИС при их изготовлении на недоверенном производстве СП МКП.

Система имеет облачную гибридную структуру с защищенным доступом через веб-интерфейс, что позволяет обеспечить ее гибкость и реализовать управление контролируемым проектированием. Особое внимание уделено вопросам защиты информации, которые решаются с помощью криптографического шифрования; серверы используют отечественное ПО Astra Linux.

Обеспечение доверенности разрабатываемых изделий реализуется на всех этапах проектирования, передачи на производство и испытания готовых образцов. В рамках работы над проектом проведен анализ подходов к верификации проекта СБИС, а также разрушающих и неразрушающих методов контроля образцов, направленных, в частности, на выявление аппаратных «троянов», собирается база данных таких «троянов». Разработана модель угроз, и на ее основе разработаны регламенты маршрута контролируемого проектирования, проводится подготовка методических указаний и РД для последующего выпуска ГОСТ по доверенным интегральным схемам.

В рамках испытаний опытного образца системы были выполнены разработки доверенных СФ-блоков и СБИС на их основе по контролируемому маршруту, показавшие практическую применимость созданных программных инструментов и регламентов.

Разрабатываемая система предоставит отечественным дизайн-центрам инструменты маршрута контролируемого проектирования в интересах развития радиоэлектронного комплекса, позволит оптимизировать процесс проектирования СБИС и обеспечить доверенность разрабатываемых сложнфункциональных изделий микроэлектроники.

Литература

1. Попов С.А. «Микроэлектроника 2022» глазами связиста // Первая миля, 2022. — № 7. — С. 20–26.
2. Механик А. Г. Гром грянул, пора перекреститься // Стимул. — 7 марта 2022. — URL: <https://stimul.online/articles/sreda/grom-gryanul-pora-perekrestitsya/> (дата обращения: 16.08.2023).
3. Власов С. Е. Государством созданы условия для формирования отечественной инфраструктуры проектирования изделий радиоэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2021. — № 3. — С. 14–19.

УДК 004.896

Развитие отечественной САПР: тренды, решения, компетенции

Иванова Е. Н.
АО «НПО «КИС»

Правительством РФ поставлена задача разработки отечественной САПР для обеспечения доверенности и технологической независимости разрабатываемой ЭКБ. Рассмотрены существующие компетенции и поставлена задача построить план развития САПР, а также выстроить кооперацию с дизайн-центрами.

Создание отечественной САПР является задачей в рамках Указа 166 по обеспечению критической инфраструктуры. Доверенные ЭКБ могут быть спроектированы только на доверенной САПР.

Рассмотрена возможность использования разработок на базе открытых САПР с проверкой исходного кода на наличие непроверяемых блоков. Запланированы ОКР на доработку функционала, отсутствующего на данный момент.

САПР из открытого кода имеют плюсы и минусы: из плюсов — все сообщество работает в направлении развития данного продукта, из минусов — мы в любой момент можем быть отключены от доступа к ресурсу и остаться без доступного решения.

Поэтому основной план — рассмотреть реализованные открытые решения и интегрировать их в свою САПР, но основная работа и репозиторий находятся на территории РФ.

На текущий момент есть разного уровня разработки отечественных компаний, которые будут вовлечены в процесс создания общего маршрута, и в процессе НИР будет составлена дорожная карта разработки САПР для текущих технологических норм с целеполаганием на 28 нм к 2030 году.

Также важен аспект сохранения разработчиков для дальнейшего развития продукта и технической поддержки.

Важно на самом раннем этапе определить стандарты, форматы данных, ОС, базу данных, чтобы интеграция между инструментами была наиболее удобной.

Также запланированы работы по адаптации PDK отечественных фабрик в отечественные САПР.

УДК 621.382.323:536.48

Библиотека SPICE-моделей электронных компонентов РЭА и методы экстракции их параметров для гражданских и специальных примененийПетросьянц К. О.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)**123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34*² *Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)**124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3**kpetrosyants@hse.ru*

Рассмотрена серия библиотек SPICE-моделей дискретных полупроводниковых приборов и компонентов ИС/БИС малой, средней и большой мощности и различного частотного диапазона без учета и с учетом влияния факторов радиации, температуры, старения. Описаны методики определения параметров SPICE-моделей с помощью программ-экстракторов из результатов измерений ВАХ и ВФХ приборов.

Ключевые слова: электронные компоненты; SPICE-модели; экстракция параметров SPICE-моделей; влияние радиации; температура; старение.

Библиотека SPICE-моделей МОП-транзисторов включает в себя набор стандартных моделей: BSIM 3v3, BSIM4, BSIMSOI3, BSIMSOI4, BSIM6, BSIM-CMG, PSP103, UTSOI2, EKV, а также их RAD- и THERM-версии. Для биполярных Si БТ/SiGe ГБТ библиотека включает модели GP, VBIC, HiCUM, MEXTRAM, а также RAD- и THERM-версии. Перечисленные SPICE-модели снабжены обширной базой данных для различных типов МОПТ и БТ, изготовленных на отечественных и зарубежных фабриках, что во многих случаях позволяет разработчикам схем использовать готовые решения, исключив предварительную трудоемкую процедуру измерений характеристик реальных приборов.

Отработаны процедуры использования трех экстракторов IC-CAP, BSIMProPlus, MBP для определения SPICE-, SPICE-RAD-, SPICE-THERM-параметров (по выбору пользователя). Описан аппаратный комплекс для измерения ВАХ и ВФХ приборов без и с учетом ВВФ и методики обработки результатов.

Температурные эффекты учитываются в сверхшироком диапазоне температур от -270 до $+300$ °С.

В моделях учитываются радиационные эффекты, обусловленные влиянием нейтронов, электронов, гамма- и рентгеновских лучей, протонов, импульсного излучения, одиночных ядерных частиц.

Приведены примеры использования программно-аппаратного комплекса для экстракции параметров SPICE-моделей электронных компонентов на предприятиях Росатома, Роскосмоса, Росэлектроники, Ростеха, Минэкономпрома, РЖД и др. с учетом их специфики.

Исследование выполнено в ходе реализации стратегического проекта НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность» за счет средств гранта в форме субсидии на реализацию программы «Приоритет-2030» и гранта РНФ (проект № 23-22-00313)

УДК 621.382

Разработка подсистемы топологического проектирования САПР СБИС

Сазонов В. В., Шеблаев М. В.

*МГУ им. М. В. Ломоносова, факультет космических исследований
117234, г. Москва, Ленинские горы, 1*

Представлен план работ по созданию отечественных компонентов САПР СБИС для топологического проектирования СБИС, в частности от этапа планирования кристалла до трассировки межсоединений. Обсуждается необходимость совместной проработки с партнерами в рамках создания сквозных маршрутов проектирования.

Ключевые слова: САПР; размещение; трассировка; научная школа.

В 1990–2000 годах в МГУ им. М. В. Ломоносова был создан научно-технический задел по созданию САПР СБИС в рамках сотрудничества с компаниями LSI, Cadence, Intel, Huawei. Были разработаны в том числе и отечественные модули САПР. В условиях отсутствия ограничений на покупку иностранного программного обеспечения и доступа к зарубежным фабрикам развитие отечественной микроэлектроники было нецелесообразным и все специалисты работали в филиалах иностранных компаний и за рубежом [1]. Подготовка кадров не велась на системной основе, но в Московском университете подобные образовательные траектории были: работама магистерская программа «Дискретные управляющие системы и их приложения» на кафедре математической кибернетики ВМК МГУ, были разработаны курсы по инструментарию проектирования интегральных схем на кафедре МаТИС механико-математического факультета.

После установления ограничений на использование продукции иностранных фабрик и покупку программного обеспечения недружественных стран задача развития отечественной микроэлектроники стала крайне актуальной [2]. Так, в рамках инициативы Минпромторга РФ в 2023 году был представлен проект НИОКР «Разработка модулей физического проектирования САПР СБИС», который объединил вокруг себя коллектив под эгидой факультета космических исследований Московского университета, а также исследователей с других факультетов, которые смогут внести синергетический вклад. Планируется развитие учебной программы подготовки специалистов в области САПР СБИС для того, чтобы отрасль, испытывающая кадровый голод, могла пополняться молодыми кадрами, которым могут быть переданы компетенции создаваемой научной школы.

Запланированы работы по созданию нескольких компонент топологического проектирования САПР СБИС [3]:

- модуль для создания плана кристалла;
- модуль для размещения элементов;
- модуль для трассировки межсоединений;
- модуль для синтеза сбалансированных деревьев синхросигнала;
- вспомогательные модули: модуль расчета временных задержек распространения сигнала, модуль контроля технологических правил (DRC), модули чтения — записи информации в маршруте проектирования, модуль графического пользовательского интерфейса и т. д.

На начальном этапе особенно важным является учет интересов потенциальных пользователей. Так, например, существующие PDK от «Микрона» поставляются с использованием БД OpenAccess и CDBA, разрабатываемый по заказу ФПИ маршрут проектирования использует наработки проекта OpenLane и БД OpenDB. Для того чтобы проект нес практическую пользу, необходима возможность интеграции в существующие маршруты проектирования вместо Cadence Innovus / Synopsys IC Compiler. Совместная проработка этих вопросов с заинтересованными партнерами предстоит на первых этапах проекта.

Литература

1. Павлюк М. И. Нам дали шанс, который выпадает раз в жизни // Электроника НТБ, 2015. — № 7.
2. Колмогоров Г., Шиллер В., Шпак В. Импортонезависимость электроники России: необходима и возможна // Компоненты и технологии, 2017. — № 4 (189). — С. 6–14.
3. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солодуха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем, 2020.

УДК 004.4 + 621.382

Экосистема проектирования интегральных схем на основе Bill of Materials

Сорокин Т. М., Бабинцев А. В., Никончук С. В.

ООО «НМ-Тех»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6,
этаж 1, помещение XII, офис 4,4а

sorokin@nm-tech.org

В статье представлена общая концепция экосистемы проектирования микросхем, основанной на идеях системы управления данными продукта (PDM), Bill of Materials (BOM) и единого проектного окружения разработчиков. Рассмотрены обобщенная структура системы, назначение и основные функции входящих в нее компонентов.

Ключевые слова: управление данными; product data management; bill of materials; проектное окружение; управление проектами.

Успех и скорость разработки изделий микроэлектроники определяются не только компетенциями инженеров и функциональностью используемых САПР, но и качеством управления проектами. Отсутствие надежного и воспроизводимого процесса создания и управления проектным окружением может приводить к существенным рискам использования различных версий одних и тех же данных (PDK, IP) или разных версий САПР разными разработчиками. Также самостоятельная настройка и согласование параметров проектного окружения отнимают ценное время инженеров и несут в себе риски ошибок конфигурации проекта.

Предлагаемая концепция экосистемы проектирования интегральных микросхем призвана решить данную проблему, предлагая разработчикам работу в едином автоматически создаваемом проектном окружении для всех участников проекта. Система включает в себя:

- электронный каталог компонентов (PDM), включающий в себя атрибуты и статус проекта, и реестр ошибок и запросов на улучшение;
- реестр созависимостей компонентов (BOM);
- инструмент создания, конфигурации и контроля проектного окружения для разработчиков в среде Unix на основе электронного каталога компонентов и BOM;
- систему управления и запуска версий САПР;
- репозиторий данных с контролем версий.

Проектировщик выбирает необходимый проект в меню в среде Unix, система автоматически загружает данные из электронного каталога компонентов в соответствии с реестром созависимостей проекта и устанавливает их в рабочую область пользователя из репозитория данных. Также создаются разнообразные служебные файлы и устанавливаются переменные окружения, полностью подготавливая рабочую область для использования. Так как источник данных един и все действия происходят автоматически, этим обеспечивается единообразие проектного окружения для всех участников проекта.

Использование описанной системы минимизирует риски использования различных версий исходных данных и САПР, экономит время на конфигурацию рабочего окружения для каждого разработчика.

УДК 621.3.049.771.14

Разработка отечественных средств интерактивной отладки, анализа и оптимизации СБИС на вентиляльном уровне для открытого цифрового маршрута проектирования**Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Коршунов А. В.***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**korshunov@org.miet.ru*

Рассматриваются проблемы развития инструментов открытых маршрутов проектирования цифровых СБИС. Дается обзор функционала открытых инструментов логического синтеза цифровых схем и подходов к оптимизации. Предлагаются подходы к развитию открытых инструментов с помощью средств инкрементного синтеза, интервального временного анализа, ускоренного анализа пикового тока и помехоустойчивости.

Ключевые слова: цифровой маршрут; автоматизация проектирования; открытое программное обеспечение; САПР; логический синтез; логическая оптимизация.

Введение

В настоящее время широкое распространение получают маршруты проектирования цифровых СБИС, основанные на инструментах с открытым исходным кодом [1]. Наибольшее распространение получили маршруты на основе пакета физического синтеза OpenROAD, в том числе OpenLane (v1 и v2) и OpenROAD Flow Scripts. Любой из открытых маршрутов, как правило, предполагает использование 10–20 отдельных инструментов или пользовательских скриптов для основных реализаций проектных процедур.

Среди таких инструментов обычно выделяют основные:

- логический синтез — Yosys и ABC;
- топологический (физический) синтез, включая задачи планировки, размещения, синтеза цепей синхронизации, трассировки — OpenROAD (множество отдельных инструментов с единой оболочкой);
- база данных физического проектирования — OpenDB;
- статический временной анализ — OpenSTA;
- физическая верификация (DRC — Magic или KLayout, LVS — Netgen/CVC).

Развитие инструментов открытого маршрута

Одним из основных недостатков, отмечаемых исследователями, является низкое значение традиционных метрик (прежде всего площадь и максимальная частота) для тестовых проектов по сравнению с коммерческими инструментами. Для относительно небольших блоков на технологии Skywater 130 нм приводятся данные об увеличении площади более чем в два раза и снижении максимальной частоты в три раза относительно маршрута в промышленном САПР [2].

На наш взгляд, возможной причиной одной из причин ухудшения качества результата являются недостатки средств логического синтеза. Обычно под процедурой логического синтеза понимают несколько задач: (1) анализ и трансляция RTL-кода на HDL; (2) логическая оптимизация — преобразование (минимизация)

на уровне логической схемы, без учета технологии; (3) перевод в базис технологической библиотеки (технологический маппинг) с одновременной оптимизацией.

В коммерческих инструментах эти модули скрыты под единой оболочкой, а в открытых инструментах Yosys предназначен для решения задачи (1), для задач 2–3 предлагается использовать пакет ABC. При этом данные средства практически не учитывают вариативность временных характеристик ASIC библиотеки и моделей межсоединений. Данная особенность приводит к значительному снижению качества (площади и временных характеристик) на уровне нетлиста уже после логического синтеза и не может быть исправлена только на этапе физического проектирования.

Другим недостатком открытого маршрута на базе OpenROAD является невозможность отладки проекта после этапа логического синтеза в графическом режиме, так как данный инструмент предполагает работу с базой данных топологического проектирования.

Для решения указанных проблем предполагается разработка нескольких модулей ресинтеза и анализа, ориентированных на реализацию промышленного функционала (статистический, интервальный временной анализ, анализ и оптимизация энергопотребления на логическом уровне), которые будут совместимы на уровне форматов с открытым маршрутом на базе OpenLane/OpenROAD, в том числе:

- графическая среда для загрузки и отображения вентиляного представления (нетлиста) СБИС с поддержкой иерархического представления проекта (размерность до 1 млн элементов), с возможностью визуализации результатов временного анализа;
- средства ресинтеза, инкрементного синтеза и оптимизации схемы на вентиляном уровне — сокращение числа элементов схемы на тестовых примерах (~23%);
- средства интервального временного анализа — снижение пессимизма в оценке вариаций на 20–40% за счет учета корреляций;
- средства анализа помехоустойчивости — повышение достоверности при учете влияния помех на 15%;
- средства ускоренного анализа пикового тока — снижение пессимизма оценки пикового тока на 50%.

Заключение

Предлагается разработка инструментов оптимизации на этапе логического синтеза для использования в открытом маршруте проектирования. Предлагаемые подходы показывают улучшение технических характеристик на 10–15% по сравнению с открытыми маршрутами.

Работа поддержана в рамках госзадания МИЭТ (FSMR-2023-0008)

Литература

1. Камкин А. С., Смоллов С. А., Чупилко М. М. Сравнение открытых маршрутов проектирования цифровой аппаратуры: qFlow, OpenLANE, Coriolis, SymbiFlow // Труды Института системного программирования РАН, 2021. — 33 (6). — С. 111–130.

2. Монахов А. М., Лукьянченко Г. А., Уманский М. В., Елизаров С. Г. Открытые маршруты синтеза цифровых схем от RTL до GDS, состояние дел в отрасли и практические результаты // Материалы 8-й научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули», форум «Микроэлектроника-2022».
3. Гаврилов С. В. Методы анализа логических корреляций для САПР цифровых КМОП СБИС. — М.: Техносфера, 2011.

УДК 621.3.049.77

Основные ограничения САПР с открытым исходным кодом на примере разработки базовых компонентов СБИС управления матричным дисплеем

Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Ласточкин О. В., к. т. н., Титов А. И.,
Забабурин А. Ю., Клычков Ф. С., Яструбинский Н. А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
atitov@niime.ru

Работа посвящена исследованию возможности разработки СБИС по маршруту проектирования на базе САПР с открытым исходным кодом. Описаны основные проблемы и пути их решения на примере спроектированных базовых компонентов СБИС управления матричным дисплеем.

Ключевые слова: маршрут проектирования; комплект средств проектирования; открытый исходный код; базовый матричный дисплей; САПР.

Введение

Основная цель исследования состоит в оценке возможности разработки дополнительных функциональных блоков с применением САПР с открытым кодом для расширения функциональности базовой СБИС. В качестве базовой выбрана СБИС управления полноцветным и монохромными активно-матричными микродисплеями для систем гражданского и специального применения, ориентированная на визуализацию информации в приближенном к реальному режиму времени.

Для проведения исследования применен маршрут проектирования СБИС на базе САПР с открытым исходным кодом. Маршрут успешно протестирован на совместимость с комплектом средств проектирования по отечественной полупроводниковой КМОП-технологии с минимальными проектными нормами 180 нм.

Ограничения САПР с открытым исходным кодом

Использование комплектов средств проектирования (КСП) для коммерческих САПР в маршруте на основе САПР с открытым исходным кодом крайне затруднено по следующим причинам:

- требуется адаптация КСП под САПР с открытым исходным кодом;
- существует ограничение на максимальное количество логических вентилях в проекте;
- затруднена работа с проектами с вложенной иерархической структурой.

Маршрут на основе САПР с открытым исходным кодом содержит [3]:

- САПР логического синтеза yosys+abc;
- скрипты для временного анализа OpenSTA;
- САПР openroad;
- топологический редактор KLayout.

Для проведения исследования были взяты RTL-описания базовых блоков СБИС управления матричным дисплеем, реализующими следующие функции:

- изменения яркости видеосигнала;
- монохромной визуализации видеосигнала;
- инверсии видеосигнала;

- цветокоррекции видеосигнала;
- изменения насыщенности видеосигнала.

Был проведен логический и физический синтез указанных блоков в базе отечественной полупроводниковой КМОП-технологии с проектными нормами 180 нм на базе коммерческих САПР и по маршруту САПР с открытым исходным кодом. Синтез выполнялся со следующими настройками: нормальные условия функционирования ($V = 1,8 \text{ В}$, $T = 25^\circ\text{C}$), тактовая частота 60 МГц, четыре слоя трассировки и плотность заполнения — 0,55. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение площади компонентов после этапа физического синтеза средствами САПР

Имя блока	Площадь после этапа физического синтеза, кв. мкм		
	САПР с открытым кодом	Коммерческая САПР	Разница
Блок изменения яркости	10412	5080	105 %
Блок монохромной визуализации	9994	5810	72 %
Блок инверсии	6901	4220	64 %
Блок цветокоррекции	12574	4440	183 %
Блок изменения насыщенности	39870	20200	97 %

Заключение

В ходе проведенного исследования была дана оценка возможности разработки отдельных функциональных блоков СБИС управления полноцветным и монохромными активно-матричными микродисплеями с применением САПР с открытым кодом. Выявлены основные ограничения САПР с открытым исходным кодом и проведено сравнение площади блоков после синтеза в маршруте на базе коммерческой САПР и САПР с открытым исходным кодом.

Подтверждена возможность применения маршрута в части доработки отдельных блоков для расширения функциональности базовой СБИС. Применение САПР с открытым кодом является компромиссным решением, которое может обеспечить выполнение задачи разработки компонентов и СБИС в целом.

Литература

1. Белоус А. И., Красников Г. Я., Солoduха В. А. Основы проектирования субмикронных микросхем. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 782 с. — ISBN 978-5-94836-603-6.
2. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В. и др. Методика автоматизированной верификации и валидации в кремнии комплекта средств проектирования цифровых СБИС // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9–1 (119). — С. 249–252. — DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.249.252.
3. Монахов А. М., Лукьянченко Г. А., Уманский М. В., Елизаров С. Г. Открытые маршруты синтеза цифровых схем от RTL до GDS, состояние дел в отрасли и практические результаты // Микроэлектроника, 2022.

УДК 621.382

Проблематика разработки командных файлов для средств физической верификации DRC и LVS для САПР с открытым исходным кодом

Милютин С. В., Надин А. С., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

smilyutin@niime.ru, anadin@niime.ru, dshipitsin@niime.ru

В данной работе рассматриваются особенности и проблематика разработки командных файлов, а также сформулированы базовые аспекты сравнительного анализа специализированных средств физической верификации DRC и LVS с открытым исходным кодом, которые необходимо учитывать при выборе таких САПР.

Ключевые слова: PDK; САПР; DRC; LVS; Magic; KLayout; OpenSource.

Введение

Уход с российского рынка таких основных разработчиков САПР, как Cadence Design System Inc, Mentor Graphics, Siemens Bussines и Synopsys Inc., стимулирует к поиску альтернативных решений для проектирования ИС. Одним из потенциально возможных решений могут быть САПР с открытым исходных кодом.

OpenSource-решения для DRC и LVS

Применение САПР с открытым исходным кодом на этапе физической верификации при проектировании ИС требует разработки соответствующих командных файлов в PDK. Для оценки проблематики разработки таких командных файлов авторами выделены базовые аспекты объективного и субъективного сравнительного анализа специализированных средств верификации DRC и LVS, которые важно учесть:

- язык среды разработки;
- среда разработки командных файлов;
- интерфейсы выбора сценария проверок;
- возможность интеграции в среду проектирования;
- логика программирования проверок;
- настройка и привязка к технологической сетке проектирования;
- наличие и полнота документации и примеров;
- поддержка иерархического режима;
- визуализация ошибок DRC/LVS;
- активное развитие и сообщество (community);
- поддерживаемые форматы топологий;
- поддержка мультипроцессорного/мультиядерного режима;
- субъективная оценка пробной реализации командных файлов DRC/LVS.

На текущий момент доступными специализированными средствами физической верификации являются программные продукты Magic и KLayout, которые широко распространены в среде OpenSource-решений для проектирования ИС.

- **Magic** — инструмент верстки СБИС, написанный в 1980-х годах в Беркли Джоном Остерхаутом, ныне известный в первую очередь благодаря написанию языка интерпретатора сценариев Tcl.

- **KLayout** — современный быстроразвивающейся проект для просмотра и редактирования топологии с возможностью расширения и настройки с помощью пользовательских скриптов на Ruby или Python.

На примере данных САПР осуществлен сравнительный анализ, а также сформулированы наиболее существенные проблемы при разработке командных файлов для DRC и LVS, присущие текущим программным OpenSource-решениям в области физической верификации [1–4].

Заключение

В работе исследована проблематика разработки командных файлов для современных средств физической верификации DRC и LVS для САПР с открытым исходным кодом. Сформулированы базовые аспекты, которые необходимо учитывать при принятии решения о включении «бесплатной» САПР в маршрут проектирования ИС.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
3. Загидулина О. Р., Надин А. С. Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № 7 (107). — С. 817–818.
4. Загидулина О. Р., Милютин С. В., Надин А. С. Фундаментальные проблемы верификации командного файла DRC и методы их решения // Наноиндустрия, 2022. — Т. 16. — № 9-1 (119). — С. 253–254.

УДК 621.382

Особенности верификации моделей межсоединений с использованием кольцевых генераторов

Потупчик А. Г., Нуштаев А. В.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
 apotupchik@niime.ru, anushtaev@niime.ru

Разработаны тестовые структуры и методика верификации моделей межсоединений комплекта средств проектирования технологии КМОП 90 и проведено сравнение результатов моделирования с измерениями в кремнии.

Ключевые слова: КМОП; BEOL; interconnection; spice; modeling; parasitic extraction; ring oscillator.

Особенностью проектирования современных интегральных схем (ИС) является привязка комплекта средств проектирования (КСП), поставляемого фабрикой-изготовителем, к конкретной технологии производства. Изменение технологических процессов на фабрике может привести к изменению параметров элементной базы и межсоединений, ввиду чего возникает необходимость ее перехарактеризации и обновления КСП, так как параметры ИС, разработанной с использованием неактуальных моделей, а также выход годных готовых изделий могут серьезно отличаться от ожидаемого в кремнии [1]. Особенно актуальным вопрос верификации межсоединений становится при уменьшении проектных норм КМОП-технологии до уровня 0,18 мкм и ниже [2].

Для оценки соответствия моделей межсоединений определенному технологическому процессу разработаны тестовые структуры кольцевых генераторов (КГ) двух типов, состоящих из кольца инверторов, делителя частоты и выходного буфера. Отличие одного кольцевого генератора от другого заключается в подключении дополнительной BEOL-нагрузки к выходу каждого инвертирующего каскада кольца, представленной в виде сочетаний последовательных и параллельных линий металлизации всех уровней, часть из которых подключена к земле, создавая таким образом дополнительные паразитные RC-цепи (рис. 1). Измерение и сравнение измеренных параметров описанных КГ позволяет отделить влияние изменений параметров активных приборов от влияния изменений BEOL-части, а также оценить его количественно.

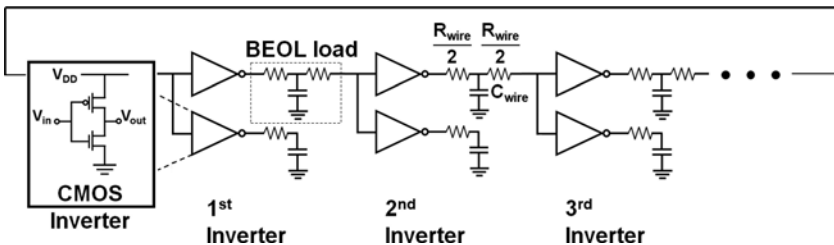


Рис. 1. Кольцо инверторов

Для исследований использовались такие параметры КГ, как частота генерации КГ, задержка на вентиль, емкость нагрузки на вентиль, статическая и динамическая утечка на вентиль. Их расчет проводился исходя из следующих данных:

- результатов измерения с пластины, произведенных в 2011, 2017 и 2021 гг. (средние значения параметров $+3\sigma/-3\sigma$);
- результатов моделирования схемы КГ после проведения экстракции паразитных составляющих межсоединений с использованием угловых моделей из поставки КСП для данной технологии (КМОП 90 нм).

Из данных измерений пластин видны заметное увеличение отношения частот генераторов (рис. 2), рост отношений динамического тока (рис. 3), а также уменьшение отношений задержки и емкости нагрузки на вентиль, что показывает комплексное изменение влияния межсоединений. В целях изучения такого тренда были проанализированы РСМ-параметры BEOL-части технологии и их изменение в зависимости от времени выпуска партии пластин. Исследование выявило устойчивый тренд на снижение сопротивлений контакт — поликремний и уменьшение толщины межсоединений для металлов с 1-го по 6-й уровень, вследствие чего общий вклад паразитных РС-составляющих в быстродействие снижается и такое изменение может потребовать либо коррекции техпроцесса для возврата к целевым значениям исследуемых параметров, либо внесения изменений в модели межсоединений для их соответствия актуальным значениям на производстве.

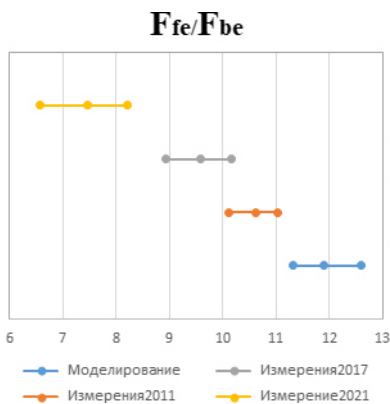


Рис. 2. Отношение частот КГ

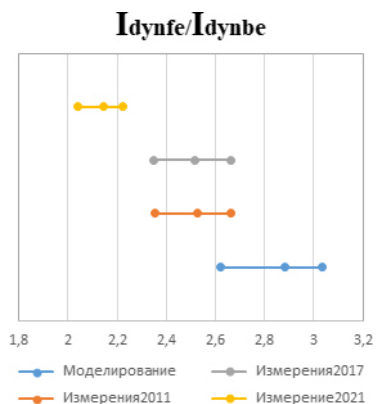


Рис. 3. Отношение динамических токов КГ

Литература

1. Шипицин Д. М., Потупчик А. Г., Нуштаев А. В. Влияние BEOL на быстродействие схем для технологий КНИ250, КНИ180, КНИ90 // Международный форум «Микроэлектроника-2020». XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе: Сборник тезисов. Республика Крым, г. Ялта, 21–25 сентября 2020 г. / Под ред. Е. С. Горнева. — Москва: МАКС Пресс, 2020. — С. 251–253.

2. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В., Шипицин Д. С., Потупчик А. Г. Отдельные аспекты анализа и оценки качества базовых технологий с проектными нормами 180 и 90 нм в условиях ограниченных ресурсов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 77–88.
3. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.

УДК 621.382.3

Разработка маршрута верификации DRC для САПР с открытым исходным кодом на примере KLayout

**Загидуллина О. Р., Надин А. С., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н.
АО «НИИМЭ»**

*124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ozagidullina@niime.ru*

В работе предложен маршрут тестирования командного файла для проведения DRC для систем автоматизированного проектирования с открытым исходным кодом.

Ключевые слова: DRC; регрессионное тестирование; QA cells; САПР.

Уход с российского рынка иностранных производителей САПР обострил вопрос импортозамещения инструментов автоматизированного проектирования. Поскольку на создание отечественных САПР для микроэлектроники потребуются годы разработки и тестирования, альтернативным решением становится попытка использования САПР с открытым исходным кодом (open source).

Проверка норм проектирования DRC (Design Rule Checking) является важнейшим этапом в разработке ИС. Создание и верификация командного файла проверки DRC (DRC-деки) — одни из самых сложных задач разработки технологии, и с уменьшением проектных норм их сложность и цена ошибки только возрастают [1]. Большинство САПР используют свои языки программирования для написания DRC-дек. Поэтому под каждую новую САПР необходимо разрабатывать DRC-деку с нуля, что в разы увеличивает сложность задачи.

Возникает необходимость разработать маршрут верификации DRC-деки для новых инструментов. Такой маршрут был разработан на примере open source САПР — KLayout. За основу был взят традиционный способ тестирования DRC-дек — квалификационные ячейки (QA cells) [2]. QA cells — топологические структуры, разработанные под каждое правило, которые содержат в одной части ячейки, нарисованные без ошибок, в другой — со всеми возможными нарушениями правила. В традиционном методе DRC-дека проверяется на соответствие правилам проектирования, описанным в DRM (design rule manual), а в предложенном методе за эталон берется уже отквалифицированная в соответствии с DRM дека. Таким образом, не только проверяется соответствие DRC-деки и DRM, но и сравнивается поведение двух дек.

По окончании разработки необходимо убедиться, что изменения, вносимые в DRC-деку в процессе, не повлияли на поведение ранее отквалифицированных правил. Для этого проводится регрессионное тестирование.

Регрессионное тестирование осуществляется на базе QA cells и DRC-дек различных версий. Результаты проверки правил проектирования после каждого запуска сохраняются в топологическом формате и сравниваются между собой. Если изменения в DRC-деке повлияли на поведение правила, то необходимо проанализировать результаты и либо исправить деку, если изменения некорректны, либо обновить базу данных результатов, если изменения ожидаемы.

Главной особенностью open source САПР является ее перманентное развитие — новые версии выходят практически каждый месяц. Это приводит к необходимости

постоянного контроля обратной совместимости, чтобы убедиться, что изменение поведения САПР не привело к изменению поведения DRC-деки. Для этого регрессионное тестирование проходит со сравнением результатов для разных версий САПР.

Предложенный маршрут тестирования DRC-деки разработан для KLayout, но является универсальным и может быть использован и для других САПР. Он позволяет исправить возможные ошибки в деке еще на этапе ее разработки и гарантирует, что DRC-дека обладает точным соответствием конструкторско-технологическим ограничениям фабрики и работает корректно.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Надин А. С., Трифанихина И. Е. Методика аттестации командных файлов физической верификации с использованием квалификационных ячеек // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 717–720.

УДК 621.396.6

Разработка и реализация политики научно-технического развития производства СВЧ-транзисторов, МИС и чиплет-модулей на основе широкозонных полупроводниковых материалов в АО «НПП «Исток» им. Шокина»**Борисов А. А., д. т. н., Буробин В. А., к. т. н.***АО «НПП «Исток» им. Шокина»**141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а**vabpulsar@mail.ru*

Техническое и технологическое переоснащение полупроводниковых производств является одним из главных условий сохранения конкурентоспособности и эффективности отечественных предприятий, а также ключевым фактором для технологического прогресса и экономического роста России. В прошедшем десятилетии были построены новые арсенид-галлиевые и нитрид-галлиевые технологические линии на основе зарубежного лабораторно-производственного оборудования.

Преодоление технологического разрыва с мировым уровнем и создание современной инфраструктуры промышленного производства российской ЭКБ СВЧ и силовой электроники (СЭ) на основе широкозонных полупроводников позволит достигнуть как расширения объемов, так и технико-экономических показателей производства для решения приоритетных задач социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации.

Одно из наиболее эффективных решений в настоящее время — с помощью чиплетов наращивать производительность, что гораздо проще, при использовании монолитных ИС. Чиплет — это микросхема, специально разработанная для совместной работы с другими себе подобными. Несколько чиплетов формируют одну более большую и сложную микросхему. Чиплетная технология благодаря полной взаимозаменяемости функциональных кластеров если не полностью снимает проблему несто процентного выхода годных чипов с каждой пластины, то в значительной мере ее нивелирует.

Для реализации этой сложнейшей задачи на отечественных предприятиях необходим комплексный подход, который стал бы наилучшим решением для создания абсолютно новых современных производств. Комплексный подход должен включать решения как для НИОКР, так и для серийного производства, а также помочь освоить принципиально новые изделия благодаря новейшему высокопроизводительному оборудованию, что позволит российским предприятиям быстро отрабатывать новые технологические режимы, обеспечивать переналадку производства в кратчайшие сроки и производить широкую номенклатуру изделий с высокой надежностью и наивысшим качеством.

Ключевые слова: монолитная интегральная СВЧ-схема (МИС СВЧ); трехмерная гетерогенная интеграция (3D ИИ); чиплетные технологии; автоматизированный полупроводниковый комплекс.



Диверсификация электронной отрасли в сочетании с освоением современной полупроводниковой электроники и радиофотоники, цифровой нано- и микроэлектроники, квантовой, фото- и оптоэлектроники должны обеспечить спрос и неуклонный рост доли отечественной электронной продукции на внутреннем рынке. Вместе с тем в части российской электроники действуют санкции и запреты на свободный доступ частных и государственных организаций к зарубежным технологиям, производственным мощностям, покупке оборудования и материалов, в том числе гражданского применения. Это усложняет реализацию основных направлений развития технологий, которые характеризуются миниатюризацией компонентов на наноуровне, нацеленных на более высокую производительность, диверсификацию функций чипа на основе интеграции нано- и микромасштабных элементов, востребованных во всех секторах российской экономики [1].

Наиболее эффективный подход дезинтеграции сложных технологических СБИС из-за стоимости, связанной с передовыми чиплетами, — еще раз деинтегрировать и разбить большую матрицу на более мелкие, чтобы улучшить процент выхода. Индустрия начала переходить к дизайну, при котором один чиплет разбивается на несколько более мелких.

Технологии для промышленного развития отрасли до 2030 года

В первой части рассмотрены вопросы развития прорывных технологий, охватывающих возможные области полупроводниковой электроники в сфере высокочастотных устройств высокой плотности интеграции высокотехнологичных МИС в приемопередающих устройствах, а также использования преимуществ широкозонных полупроводников в фундаментальных свойствах материалов, таких как GaAs (арсенид галлия) и GaN (нитрид галлия). Технологии позволяют интегрировать различные семейства микросхем со встроенными пассивными компонентами для создания миниатюрных радиомодулей и радиочастотных функций, которые предлагают значительные преимущества в размерах и производительности по сравнению с обычными дискретными решениями [2, 3].

Во второй части статьи исследованы технологии проектирования на основе чиплетов, объединяющие несколько гетерогенных матриц различных функциональных блоков схем в один чип с использованием передовой технологии упаковки. Этапы создания и внедрения по мере продвижения новых технологических кристалльных линеек, резко растущая стоимость, цикл проектирования и сложность заставляют промышленность сосредоточиться на чиплетах. Чиплеты позволяют разработчикам микросхем объединять устройства, изготовленные на разных технологических линиях, и повторно использовать их в разных проектах, что помогает снизить затраты при проектировании и повысить процент выхода. Благодаря передовым технологиям 2.5D, 3D-специализированных гетерогенных упаковок обеспечиваются высокопроизводительные межсоединения мультичипов, что улучшает интеграцию систем и оптимизацию производительности и энергопотребления [4].

В третьей части в рамках разработанного проекта «Освоение промышленных радиоэлектронных технологий» подготовлены предложения по созданию экономически целесообразной и масштабируемой производственной технологии гетерогенной интеграции широкого спектра устройств и материалов с комплексными цифровыми и аналоговыми решениями на кремниевых пластинах и других

интерпозерах. Создание производственно-технологического комплекса характеризуется на наноуровне миниатюризацией компонентов, нацеленных на более высокую производительность, диверсификацию функций чиплетов на основе нано- и микромасштабных элементов с топологическим уровнем до 65 нм по технологиям гетероинтеграции.

Большинство технологических барьеров и проблем в равной мере стоят перед всеми производителями полупроводниковой промышленной аппаратуры: повышенная надежность, достаточная ширина полос передачи, адекватное теплоотведение, большая длительность жизненных циклов изделий и сроков эксплуатации, надежность цепочки поставщиков; и поэтому крайне необходимо обозначить потенциальные решения в области тенденций развития передовых технологий чиплетов как важной составляющей современной индустрии современных и перспективных радиочастотных систем.

Литература

1. Борисов А.А., Буробин В.А. Обзор современных технологий гетеро-интеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений A^3B^5 и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 256 с.
2. Карасев М.С. Приемно-передающий submodule X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2020. — Вып. 3 (546).
3. Иовдальский В.А., Далингер А.Г., Соколов И.А., Карасев М.С. Приемно-передающие модули АФАР СВЧ-диапазона. Учебное пособие / под ред. Борисова А.А. — М.: КУРС, 2022. — 200 с.
4. Чжэн Чжон, Тэ Мен Гым, Ким Сан Хен. Гетерогенная и монолитная технология 3D-интеграции для МИС со смешанными сигналами // Корейский передовой институт науки и технологий (KAIST). — Тэджон 34141, Корея. — 22 сентября 2022 г.
5. Новиков В., Суханов Д. Повышение эффективности производства за счет непрерывного создания новых прорывных технологий в полупроводниковой промышленности // Вектор высоких технологий, 2018. — № 4 (39).



УДК 621.382.2/3

Особенности технологического базиса производства GaAs/GaN МИС СВЧ для отечественных дизайн-центров и fabless-компаний

Кишинский А. А., Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С.

АО «Микроволновые системы»

105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1

avk@mwsystems.ru

Выполнен анализ возможностей отечественных дизайн-центров и fabless-компаний в части выбора отечественных и (или) зарубежных технологических партнеров для производства монокристаллических интегральных схем СВЧ.

Ключевые слова: монокристаллическая интегральная схема; диапазон СВЧ; технологический процесс; fabless-компания; взаимодействие по методу foundry.

В настоящее время мировой рынок электронной компонентной базы (ЭКБ) предлагает широкую номенклатуру монокристаллических интегральных схем (МИС) СВЧ, которые могут быть использованы для построения радиотрактов систем и комплексов различного назначения. Однако по-прежнему существуют мотивы для заказной разработки ЭКБ в интересах отечественных предприятий-потребителей, среди которых можно отметить следующие: решение проблемы заградительных барьеров от производителей ЭКБ как способа конкурентной и (или) политической борьбы; решение задачи оптимизации технических и экономических показателей комплексного проекта за счет применения специализированной ЭКБ с характеристиками, отличающимися от тех, которыми обладают коммерчески доступные образцы; удовлетворение потребности заказчиков обладать интеллектуальными правами на разработанную ЭКБ, в частности правами на ее производство и поставки сторонним потребителям, а также другие мотивы.

Нарастающее санкционное давление, а также прекращение сотрудничества целого ряда зарубежных высокотехнологичных предприятий с российскими дизайн-центрами и fabless-компаниями, работающими в сфере микроэлектроники СВЧ, привели к вынужденному пересмотру технологического базиса и, как следствие, переоценке возможностей решения задач, обозначенных выше.

В докладе представлены результаты поиска отечественных и зарубежных потенциальных технологических партнеров, с которыми возможна организация взаимодействия по методу foundry; выполнен анализ уровня технических параметров для ряда функциональных узлов СВЧ в монокристаллическом интегральном исполнении, которые могут быть достигнуты в «новом» технологическом базисе; сделаны выводы, способны ли дизайн-центры и fabless-компании в доступном им сегодня базисе технологий конкурировать с отечественными предприятиями, обладающими собственными технологическими линиями по производству МИС СВЧ.

УДК 621.382.2/3

Универсальный приемо-передающий канал АФАР X-диапазона на основе СВЧ МИС собственной разработки**Кишинский А. А., Кондратенко А. В., Бутерин А. В., Иванов А. В., Шишкин Д. А., Сорвачев П. С., Щербаков А. С., Миннебаев В. М., Миннебаев С. В., Редька Ал. В.***АО «Микроволновые системы»
105122, г. Москва, Шелковское ш., 5, стр. 1*

Представлены результаты разработки и испытаний универсального ППК X-диапазона на основе СВЧ МИС разработки АО «Микроволновые системы».

Ключевые слова: приемо-передающий модуль (ППМ); монолитная интегральная микросхема (МИС); fabless — foundry; полупроводник.

ППМ является основой пространственного канала обработки сигнала в АФАР РЛК [1]. Электрические, конструктивные и ценовые параметры ППП определяют облик создаваемой системы.

Создание полупроводниковых компонентов по маршруту fabless — foundry позволяет одновременно разрабатывать и совершенствовать ТТХ всех компонентов РЛК (МИС, модули, блоки и др.), что принципиально отличается от разработки на основе коммерчески доступных ЭРИ.

Основой любого ППП является ППК, формирующие основные СВЧ-характеристики. Применение в ППК МИС на основе широкозонных полупроводников [2] позволило достичь высокой повторяемости СВЧ-характеристик, повысить надежность, уменьшить массогабаритные параметры, снизить трудоемкость изготовления и настройки ППП.

Используя специализацию fabless — foundry для создания МИС СВЧ, удалось разработать и изготовить универсальный ППК АФАР X-диапазона на основе МИС собственной разработки.



Рис. 1. ППК для ППП АФАР X-диапазона



В состав ППК входит GaN МИС импульсного усилителя мощности MSN560V с $P_{\text{вых.имп}} \geq 9,5$ Вт в $\Delta F = 8,5\text{--}11,0$ ГГц [3]. МИС включает детектор выходной мощности, а площадь кристалла ($3,8 \text{ мм}^2$) в пять раз меньше аналогичных GaAs МИС.

Управляемые фазовращатели и аттенюаторы СВЧ — основные элементы аналогового диаграммообразования АФАР. В ППК эти функции возложены на многофункциональную GaAs МИС MSP003D со следующими параметрами:

- $K_{\gamma} = 19\text{--}20$ дБ в режимах «прием»/«передача»,
- $P_{\text{вых}} = 100$ мВт в режиме «передача»,
- управление — ТТЛ/КМОП,
- СКО установки затухания / фазового сдвига — 0,5 дБ/2 град.

В целях расширения динамического диапазона приемника в состав ППК входит МИС 1-разрядного 20-дБ аттенюатора.

Для повышения точности установки амплитуды и фазы сигнала использована GaAs МИС фазовращателя/аттенюатора MSP012D с драйвером управления, обеспечивающая дискреты вносимой фазы 1,4/2,8 град., дискреты вносимого затухания 0,5—1—2 дБ.

Вышеперечисленные МИС позволили изготовить универсальный ППК со следующими параметрами:

- $P_{\text{вых.имп}} = 9,5\text{--}11,0$ Вт,
- K_{γ} в режиме «передача»/«прием» — 40 дБ/32 дБ,
- $K_{\text{ш}} \leq 2,2$ дБ,
- дискрет управления фазой/амплитудой — 1,5 град/0,5 дБ,
- габаритные размеры — $24 \times 19 \times 4$ мм,
- масса — 5 гр.

Литература

1. Белопицкий А. В., Борисов О. В., Колковский Ю. В. и др. Антенный электронный блок для спутниковой АФАР X-диапазона // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые прибор, 2017. — Вып. 3 (246). — С. 15—25.
2. Andrey Kistchinsky, Ultra-Wideband GaN Power Amplifiers — From Innovative Technology to Standart Products — Ultra Wideband Communications // Novel Trends — System, Architecture and Implementation, Intech, 2011. P. 213—232.
3. Кондратенко А. В., Шишкин Д. А., Щербakov А. С., Миннебаев С. В. GaN МИС усилителя мощности X-диапазона с функцией контроля уровня мощности // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-Электроника-2023». — 25—26 мая 2023 г. — С. 37—38.

УДК 621.3.049.77

Проектирование монолитного СВЧ-усилителя F-класса

Дудинов К. В., Заднепрная Н. И.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

kvudinov@istokmw.ru

В данной статье рассматривается подход к проектированию монолитных СВЧ-усилителей F-класса в X-диапазоне на основе технологического процесса РНЕМТ на GaAs с нормой 0,25 мкм.

Ключевые слова: GaAs; рНЕМТ; МИС СВЧ; усилитель F-класса.

Введение

Как правило, выходной усилитель, который обеспечивает необходимый уровень сигнала на выходе сверхвысокочастотного передатчика, является основным потребителем энергии. Одним из интересных решений является разработка усилителей F-класса.

Работа усилителя F-класса во многом соответствует работе усилителя В-класса. Ток в рабочем режиме через транзистор протекает только половину периода (угол отсечки равен 90°). В усилителе F-класса в момент протекания тока стока напряжение сток-исток поддерживается близкое к нулю (рис. 1). Поэтому в усилителях класса F теоретически достижим КПД, близким к 100%.

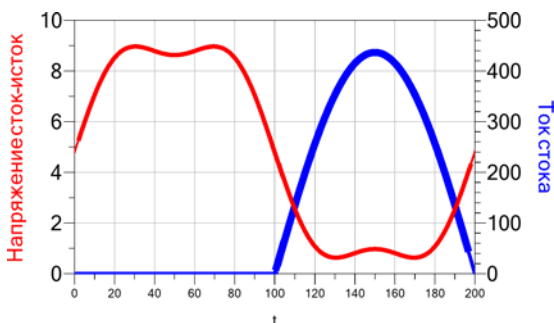


Рис. 1. Форма напряжений сток-исток и форма тока для транзистора в режиме класса F

Проектирование МИС СВЧ-усилителя F-класса в X-диапазоне

Проектирование усилителей F-класса в X-диапазоне требует учета влияния паразитных элементов, таких как индуктивности заземления, затворные и стоковые цепи, емкости, обратные связи (рис. 2).

Первый шаг дизайна усилителя F-класса — выбор режима по току транзистора. Режим транзистора в глубокой отсечке ($V_{gs} \leq -1,2$ В), несмотря на высокий КПД (до 80%), является не лучшим из-за катастрофического снижения коэффициента усиления (до -3 дБ) и выходной мощности. Режим начала отсечки ($V_{gs} \geq -0,45$ В) также не является оптимальным по КПД. В нашем случае ток транзистора определяется напряжением $V_{gs} = -0,7$ В.

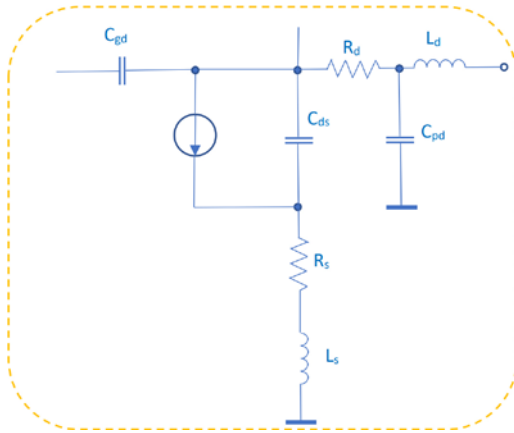


Рис. 2. Выходная часть модели транзистора с паразитными элементами

Второй шаг — определение рабочей полосы усилителя. Снижение добротности контуров выходной цепи расширяет рабочую полосу (см. рис. 3) за счет введения дополнительных потерь. А это, в свою очередь, снижает выходную мощность и КПД. В нашем случае для обеспечения рабочей полосы 2 ГГц в X-диапазоне определяем добротность каждого контура выходных цепей транзистора $Q = 1,6 \dots 2$.

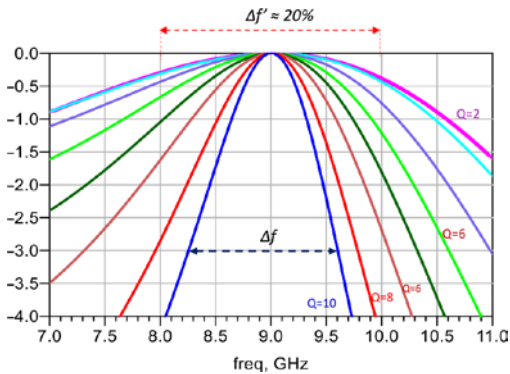


Рис. 3. Зависимость полосы пропускания выходной цепи от его добротности

Последний шаг самый трудоемкий — создание топологии и проведение электромагнитного анализа. На рис. 4 представлено фото реализованного кристалла усилителя F-класса. Для увеличения выходной мощности была применена схема суммирования на двух транзисторах fet10x56. Кристалл усилителя F-класса обеспечивает выходную мощность более 1 Вт (см. рис. 5) и коэффициент полезного действия не менее 60 % (см. рис. 6) в рабочей полосе 8–10 ГГц.

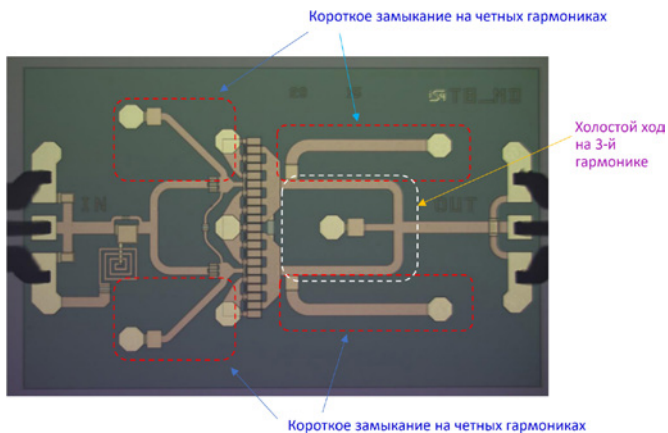


Рис. 4. Фото МИС СВЧ-усилителя F-класса X-диапазона

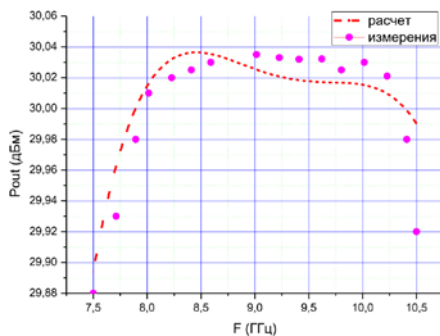


Рис. 5. Результаты измерений и расчетов выходной мощности МИС СВЧ-усилителя F-класса

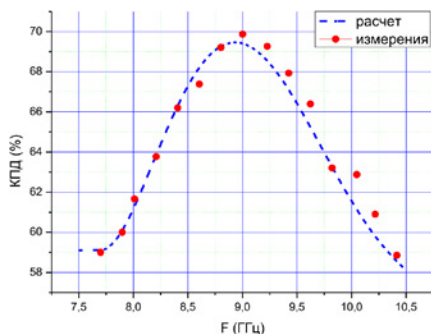


Рис. 6. Результаты измерений и расчетов КПД МИС СВЧ-усилителя F-класса



Заключение

Рассмотрен подход к проектированию СВЧ монолитных усилителей F-класса в X-диапазоне на основе технологического процесса РНЕМТ на GaAs с нормой 0,25 мкм. Реализованный МИС СВЧ-усилителя F-класса обеспечивает в рабочей полосе 8–10 ГГц выходную мощность более 1 Вт и коэффициент полезного действия не менее 60 %.

Литература

1. Schmelzerand D., Long S.I. A GaN HEMT Class F Amplifier at 2 GHz with > 80 % PAE // IEEE J. Solid-State Circuits, 2007. Vol. SC-42. P. 2130–2136.

УДК 621.37

Разработка для авиационно-космических радиоэлектронных систем на отечественной элементной базе фильтров радиопомех частотного диапазона 9 кГц — сотни МГц, обеспечивающих наиболее жесткие требования допустимого уровня электромагнитных помех**Дмитриков В. Ф.¹, Исаев В. М.², Куневич А. В.³, Павлов С. В.⁴,
Шушпанов Д. В.¹***¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича**193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, корп. 1, литера А, Ж
Dmitrikov_VF@mail.ru, dimasf@inbox.ru**² АО «Российская электроника»**121357, г. Москва, ул. Верейская, 29, стр. 141**³ ООО «СЗЛ»**196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 5А**⁴ ПАО «Мстатор»**174401, г. Новгородская обл., г. Боровичи, ул. А. Невского, 10
info@mstator.ru*

Рассмотрены особенности и проблемы проектирования современных фильтров радиопомех (ФРП) с диапазоном частот от девяти кГц до сотен МГц, разработанный на отечественной элементной компонентной базе. Показано, что основными требованиями к ФРП с перекрытием частотного диапазона 11 000 раз кроме требуемого ослабления электромагнитных помех являются: обеспечение тока утечки 5 мА, обеспечение устойчивости системы «ФРП — преобразователь».

Выявлено, что лучшим материалом для сердечников дросселя ФРП является нанокристаллический сплав, производимый ПАО «Мстатор», г. Боровичи.

Ключевые слова: фильтр радиопомех; дроссель; конденсатор; схема замещения; электромагнитная совместимость.

Для обеспечения электромагнитной совместимости высокоэффективных импульсных преобразователей с первичной сетью электропитания и функциональной радиоэлектронной аппаратурой (РЭА), запитанной от этой сети, используются сетевые фильтры радиопомех (ФРП) от симметричных и несимметричных помех.

На выбор типа схемы ФРП и его параметры влияют: современные очень жесткие требования для космических систем по удельным массогабаритным показателям, требования допустимого тока утечки (5 мА) через несимметричный конденсатор ФРП и тело человека (при его прикосновении к незаземленному корпусу), а также требование обеспечения устойчивости системы «ФРП — ИВЭП» [1]. Проблема обеспечения устойчивости системы обусловлена тем, что выходное сопротивление ФРП и входное сопротивление ИВЭП являются комплексными величинами, при равенстве которых система возбуждается и может выйти из строя [1]. Для обеспечения устойчивости данной системы требуется знаний этих сопротивлений [1], а это не предоставляют ни разработчики ФРП, ни разработчики ИВЭП.



Теория анализа и синтеза ФРП принципиально отличается от анализа и синтеза классических фильтров для радиотехнических устройств и систем, которые обычно работают в малом диапазоне частот с перекрытием в разы. Современные ФРП работают в диапазоне частот от единиц кГц до нескольких сотен МГц, т.е. с перекрытием частоты в 10^4 раз. При этом на работу ФРП в верхней части диапазона сказываются паразитные параметры конденсаторов и дросселей так, что дроссели и конденсаторы уже не обеспечивают требуемого уровня подавления ЭМП. Характеристики ФРП, рассчитанные без учета паразитных параметров дросселей и конденсаторов, превращаются в характеристики режекторного фильтра — начиная с единиц МГц и выше ослабление ЭМП падает в десятки тысяч раз.

Для корректного проектирования ФРП с учетом всех перечисленных требований (требуемое ослабление ЭМП в заданном диапазоне частот; обеспечение требуемых массогабаритных характеристик, тока утечки; обеспечение устойчивой работы системы «ФРП — ИВЭП») необходимо знать электрические схемы замещения дросселей и конденсаторов в широком диапазоне частот, импедансы которых с требуемой точностью совпадают с экспериментально измеренными импедансами дросселей и конденсаторов. Ни отечественные, ни зарубежные разработчики дросселей и конденсаторов не предоставляют их поведенческие модели.

Только построив поведенческие модели конденсаторов и дросселей [2–5], определив из них паразитные параметры и выбрав отечественные конденсаторы и дроссели с минимальными паразитными параметрами, авторы разработали ФРП с подавлением ЭМП в эквиваленте сети в диапазоне частот 35 кГц — 100 МГц не ниже 40 дБ (рис. 1), что позволило достичь уровень ЭМП в диапазоне частот 9 кГц — 100 МГц ниже самой жесткой кривой в соответствии с ГОСТ Р 51-527-99. Ни в зарубежной, ни в отечественной литературе таких результатов авторы не нашли.

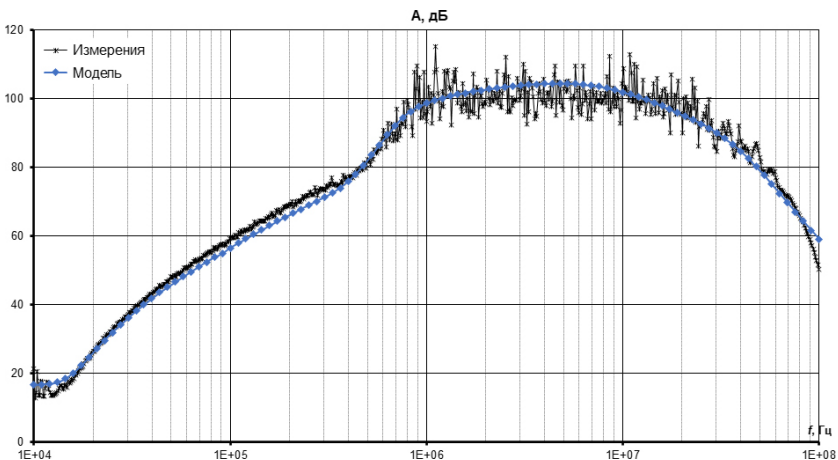


Рис. 1. Ослабление фильтра радиопомех: измеренное и полученное по модели

Литература

1. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. — М.: Горячая линия — Телеком, 2019. — 540 с.
2. Дмитриков В. Ф., Исаев В. М., Куневич А. В., Шушпанов Д. В., Петроченко А. Ю. Высокочастотная модель катушки индуктивности // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 415–417.
3. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Эквивалентная схема замещения дросселя, намотанного на феррите, в широком диапазоне частот (0 Гц — 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2022. — Т. 25. — № 3. — С. 25–45.
4. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Эквивалентная схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот (0 Гц — 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2021. — Т. 24. — № 4. — С. 43–57.
5. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В., Фоченков Э. А. Эквивалентная схема замещения дросселя на нанокристаллическом сердечнике с большой магнитной проницаемостью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2022. — Т. 25. — № 4. — С. 100–121.



УДК 621.3.011.7

Интеллектуальная САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец» и ее применение для синтеза малошумящих усилителей

Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Метель А. А.

ООО «50ohm Технолоджиз»

634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147

alexey.kalentyev@50ohm.tech

В докладе представлено описание подходов, используемых в интеллектуальной САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец». В качестве примера показано ее применение для синтеза схемных решений малошумящих усилителей на библиотеке стандартных элементов 0,25 мкм GaAs рНЕМТ-технологии АО «Светлана-Рост».

Ключевые слова: интеллектуальная САПР; синтез схемного решения; малошумящий усилитель; генетический алгоритм; СВЧ МИС; дубликат PDK.

Введение

Разработка СВЧ интегральных схем (ИС) невозможна без применения САПР, решающих задачи получения комплекта конструкторской документации, необходимой для их производства на фабрике. Рост вычислительных мощностей, доступных разработчикам СВЧ ИС, вместе с развитием методов искусственного интеллекта (ИИ) открывают новые возможности по созданию интеллектуальных инструментов в САПР, что, в свою очередь, значительно увеличивает производительность труда и сокращает цикл от идеи до изготовления изделия [1]. В докладе представлено описание подходов, используемых в интеллектуальной САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец», и ее применение для синтеза малошумящих усилителей (МШУ).

Интеллектуальная САПР

В инженерной практике существует множество СВЧ ИС, отличающихся широкой номенклатурой технических характеристик, технологиями изготовления и областью применения. Разработка интеллектуальной САПР в своей основе должна иметь способы «оцифровки» задач проектирования различных устройств для дальнейшего поиска решений с использованием выбранного метода ИИ. Высокую эффективность показывает подход, заключающийся в формировании морфологического множества проектируемых устройств [2, 3]. В качестве интеллектуальных алгоритмов, позволяющих исследовать многомерные поисковые пространства электрических схем с множеством локальных оптимумов, хорошо себя показали эволюционные алгоритмы [3, 4]. Для практического использования интеллектуальной САПР необходимо обеспечить возможность использования моделей СВЧ-компонентов из библиотек фаундри-компаний.

Сочетание описанных выше компонентов позволило разработать прототипы программных модулей для синтеза схемных решений СВЧ ИС, а также верифицировать их на практике [5], в их числе усилители с распределенным усилением, секции ступенчатых аттенюаторов и фазовращателей и др. Следует отметить значительное сокращение времени разработки схемных решений СВЧ ИС с нескольких

месяцев/недель до нескольких дней/часов. По результатам проведенных исследований получено подтверждение масштабирования предложенного подхода на разработку других классов устройств.

По результатам этой работы коллективом авторов разработана доступная для закрытого бета-тестирования интеллектуальная САПР «Смекалец», включающая модуль разработки СВЧ МШУ и позволяющая выполнить автоматическую генерацию схемного решения по комплексу требований к электрическим характеристикам на моделях из библиотеки элементов фаундри-компаний, провести экспорт решения в коммерческую САПР СВЧ-устройств полного цикла для финальной доработки и ЭМ-анализа топологии, подготовки чертежей фотошаблонов.

Отдельно стоит отметить, что авторами работы не ставилась задача функционального замещения имеющихся на рынке коммерческих САПР СВЧ-устройств полного цикла. Поэтому важной частью процесса проектирования с использованием САПР «Смекалец» является бесшовная интеграция с используемой в промышленности САПР СВЧ-устройств полного цикла.

Заключение

В данном докладе представлено описание подходов, используемых при разработке интеллектуальной САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец», и ее применение для синтеза схемных решений малошумящих усилителей.

Литература

1. Synopsys, Cadence, Google And NVIDIA All Agree: Use AI To Help Design Chips. Forbes. 2021 (Aug).
2. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады ТУСУР, 2011. — № 2–2 (24). — С. 204–211.
3. Kalentyev A. A., Babak L. I., Garays D. V. Genetic-algorithm-based sythesis of low-noise amplifiers with automatic selection of active elements and DC biases // 2014 9th EuMIC. IEEE, 2014. P. 520–523.
4. Zebulum R. S., Pacheco M. A., Vellasco M. M. Evolutionary electronics: automatic design of electronic circuits and systems by genetic algorithms. CRC press, 2018. 304 p.
5. Калентьев А. А., Добуш И. М., Горяинов А. Е., Сальников А. С. Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем // Электроника НТБ, 2022. — № 3 (214). — С. 76–81.



УДК 621.382

Особенности разработки усилителя промежуточной частоты по технологии НВТ на подложке GaAs

Макарцев И. В.^{1,2}, Беляков В. А.¹, Фефелов А. Г.¹, Дюков Д. И.¹, Елагина Е. И.¹¹ АО «НПП «Салют»

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 7, корп. 1

makartseviv@nppsolut.ru

² ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

В работе приведены результаты разработки и экспериментального исследования усилителя промежуточной частоты, выполненного по НВТ-технологии на подложке GaAs в виде монолитной интегральной схемы.

Ключевые слова: транзистор; усилитель мощности; НВТ; GaAs; МИС; ГБТ.

Гетеробиполярные транзисторы нашли широкое применение в радиотехнике благодаря своим преимуществам [1]: высокое быстродействие, высокий коэффициент усиления, малость коэффициента шума, высокая линейность характеристик, отсутствие необходимости двухполярного питания. Помимо этого, необходимо отметить относительно простую технологию структуры ГБТ. С одной стороны, экономится площадь кристалла, а с другой — процесс эпитаксии, которым формируются тонкие слои транзистора, снижает требования к литографическому оборудованию и существенно снижает стоимость устройства. Биполярные транзисторы с гетеропереходом выигрывают в линейности характеристик, хотя и уступают полевым транзисторам по энергопотреблению.

Пластина для изготовления ГБТ на переходе AlGaAs/GaAs представляет собой слоистую структуру. Слои имеют различную степень легирования, химический состав и тип проводимости. Структура, на которой изготавливались транзисторы, была выращена МЛЭ на полуизолирующей подложке GaAs ориентации (001). Толщина слоя базы $d = 70$ нм, и концентрация носителей заряда в нем $p = 3,2 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Данный транзистор был изготовлен на производственной площадке АО «НПП «Салют». Была построена динамическая модель транзистора, а также библиотека проектирования. Внешний вид базового тестового транзистора показан на рис. 1.

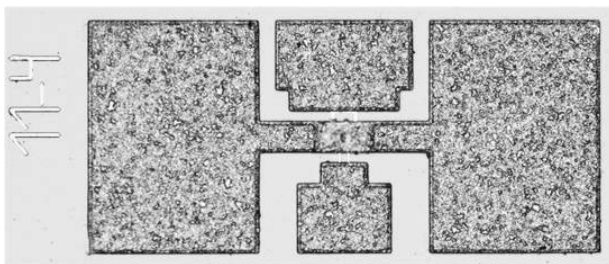


Рис. 1. Внешний вид тестового транзистора

На основе библиотеки был разработан и изготовлен усилитель промежуточной частоты со следующими параметрами:

- диапазон частот от 10 МГц до 500 МГц;
- коэффициент усиления не менее 19 дБ;
- коэффициент шума не более 6 дБ;
- верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу не менее 17 дБм;
- ток потребления не более 90 мА.

На рис. 2 показаны результаты расчетов и измерений электрических параметров МИС усилителя. Расчет производился в среде САПР AWR. Измерения проводились с применением векторного анализатора цепей и источника — измерителя тока. Напряжение питания — 5 В, ток потребления — около 70 мА. Питание схемы однополярное.

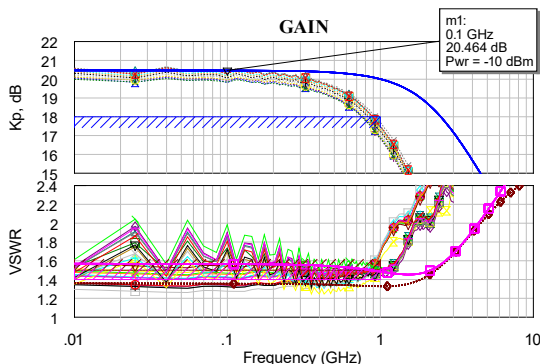


Рис. 2. Коэффициент усиления в дБ и КСВН входа и выхода МИС усилителя. Сплошной линией показаны результаты расчета, прерывистой — результаты измерений

Из рис. 2 видно, что результаты измерений хорошо совпадают с результатами проектирования. Усилитель работает в полосе до 500 МГц с усилением около 19 дБ и КСВН менее 2.

Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу на частоте 100 МГц показана на рис. 3.

В результате измерений ВГЛАХ изготовленного усилителя было получено значение выходной мощности более 17 дБм на частоте 100 МГц. Таким образом, показана возможность разработки и изготовления МИС усилителей мощности по технологии ГБТ, в том числе низкочастотных.

Разработанная технология позволяет создавать на основе ГБТ монолитные интегральные схемы (МИС) различного назначения, включая многофункциональные устройства, в частности СВЧ усилительные, генераторные и преобразовательные элементы на арсениде галлия с повышенной радиационной стойкостью для работы в миллиметровом и сантиметровом диапазоне длин волн.

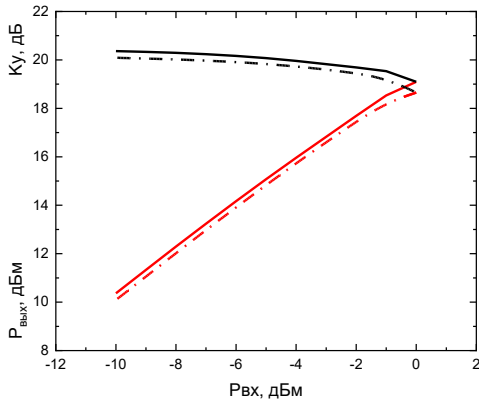


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления и выходной мощности от входной мощности

Литература

1. Kroemer H. Heterostructure Bipolar Transistors and Integrated Circuits // Proceedings of the IEEE, 1982. Vol. 70. P. 13.

УДК 621.375.4

Сверхширокополосный малозумящий распределенный усилитель на основе каскодной GaAs транзисторной ячейки для применения в высокопроизводительных измерительных комплексах

Саури А. Д., Клоков В. А., Сарайкин А. И., д. т. н., Каргин Н. И., Гузньева Е. А.
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
 115409, г. Москва, Каширское ш., 31
 ADSauri@mephi.ru

Для современных измерительных комплексов и систем связи требуются усилители с малой неравномерностью и сверхширокой полосой пропускания. В данной работе показана модель МИС усилителя с распределенным усилением, построенной на модели GaAs-транзистора, разработанной в НИЯУ МИФИ для собственного техпроцесса с проектной нормой 0,15 мкм.

Ключевые слова: GaAs; распределенный усилитель; каскодная ячейка; твердотельная СВЧ электроника; измерительная техника; сверхширокополосные сигналы.

Одним из ключевых преимуществ современных систем связи являются высокие скорости и широкие полосы передачи данных. Одним из вариантов усиления широкополосных импульсных сигналов является применение усилителей с распределенным усилением (УРУ).

В качестве усилительного элемента была принята модель транзистора, разработанная в НИЯУ МИФИ [1]. Предложенная модель верифицирована на измерениях ВАХ транзисторов, изготовленных в НИЯУ МИФИ по техпроцессу GaAs 0,15 мкм. Модель демонстрирует коэффициент усиления по напряжению 12 дБ, ток стока $I_c = 250$ мА/мм и граничную частоту работы $F_{gr} = 45$ ГГц. Схема и внешний вид модели показаны на рис. 1.

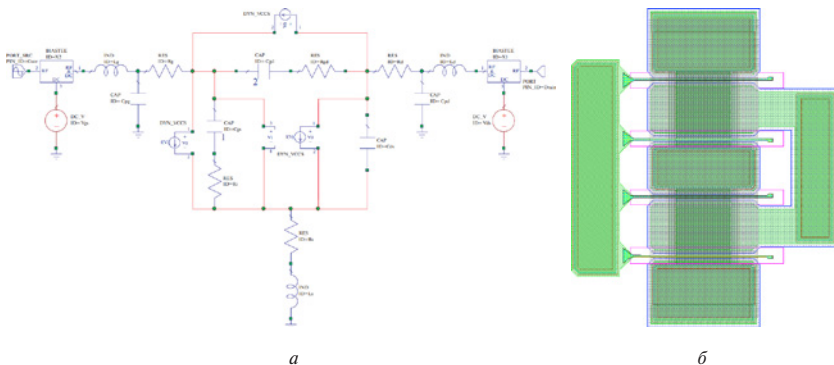


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) модели



На основе данной модели была рассчитана каскодная ячейка усилителя, в нижнем плече применена схема подачи автосмещения, а в верхнем, поскольку транзистор является нормально открытым, использован нулевой потенциал. Схема ячейки показана на рис. 2а.

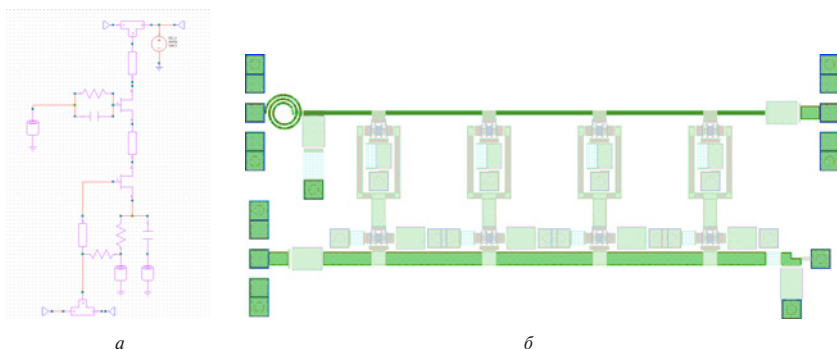


Рис. 2. Схема ячейки (а); внешний вид (б) модели УРУ

На рис. 2б показан внешний вид модели УРУ, построенный на основе четырех ячеек, соединенных индуктивными линиями и дополненных цепями подвода питания и терминирования. Разработанная модель УРУ в режиме малого сигнала демонстрирует коэффициент усиления 11 дБ в полосе 2–28 ГГц, рис. 3а, неравномерность коэффициента передачи составляет ± 1 дБ. Величина коэффициента шума $N_f = 4$ дБ в полосе 1,5–25 ГГц с ростом частоты возрастает до значения 6 дБ, рис. 3б. В режиме большого сигнала определена точка компрессии, значение которой составляет P_1 дБ = 0 дБм.

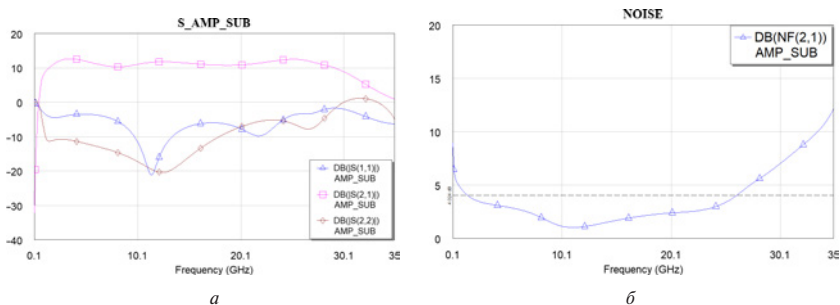


Рис. 3. Коэффициенты отражения и усиления (а), шума (б)

В рамках настоящей работы показана модель УРУ, состоящая из четырех каскодных ячеек и построенная на основе модели транзистора НИЯУ МИФИ для изготовления МИС усилителя по технологическому процессу GaAs 0,15 мкм.

Литература

1. Цунваза Д. и др. Разработка нелинейной модели псевдоморфного 0,15 мкм рHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора // Микроэлектроника, 2023. — Т. 52. — № 3. — С. 200–206.
2. Wang Y. et al. A Broadband Amplifier With Flat Bandwidth for Modulator and Measurement Driver Circuits // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022. Vol. 71. P. 1–9.
3. Tan X. et al. 2–20 GHz ultra-wideband distributed low noise amplifier // 2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). IEEE, 2020. P. 1–2.
4. Chang H. Y. et al. Design and analysis of a DC-43.5-GHz fully integrated distributed amplifier using GaAs HEMT–HBT cascode gain stage // IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2010. Vol. 59. № 2. P. 443–455.



УДК 621.382

Современные требования к разработке и функциональности моделей СВЧ-транзисторов для проектирования интегральных схем

Попов А. А.¹, Добуш И. М.¹, Сальников А. С.¹, Дудинов К. В.²,
Емельянов А. М.², Зыков Д. Д.³, Подвигалкина Н. О.³

¹ ООО «500m Технолоджиз»

634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
artem.popov@500m.tech

² АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
kvdudinov@istokmw.ru

³ ООО «Центр проектирования и технологий полупроводниковых изделий»
123592, г. Москва, ул. Кулакова, 20, корп. 1
d.zykov@i-pdk.ru

В докладе представлен обзор современных требований к разработке и функциональности моделей СВЧ-транзисторов, применяемых в процессе проектирования СВЧ монолитных интегральных схем. Также представлен пример построения масштабируемой нелинейной шумовой модели транзистора с учетом данных требований.

Ключевые слова: компактная модель; СВЧ-транзистор; динамические эффекты; масштабирование; СВЧ МИС; САПР; экстракция параметров.

Введение

Согласно лучшей мировой практике вопросы технологии производства ЭКБ следует решать параллельно с задачами моделирования и проектирования, где требуются соответствующие математические модели, методы и программное обеспечение (ПО). В качестве наглядного примера применения этой практики можно выделить использование библиотеки базовых элементов для обеспечения эффективного взаимодействия фабрик, занимающихся производством СВЧ ЭКБ, и дизайн-центров, осуществляющих разработку схемы и топологии устройства. Основой для библиотеки элементов являются модели компонентов, способные воспроизводить характеристики изготовленных элементов в САПР радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В докладе рассмотрены современные требования, предъявляемые к моделям СВЧ-транзисторов с точки зрения процедуры их построения и функциональности.

Возможности современных моделей СВЧ-транзисторов

На основе анализа моделей GaAs pHEMT и GaN NEMT из ряда современных коммерческих библиотек элементов были определены функциональные возможности, среди которых можно выделить следующие: поддержка всех современных методов анализа электрических цепей в частотной и во временной области; возможность масштабирования по периферии затвора и температуре окружающей среды, учет технологического разброса; наличие масштабируемой топологической ячейки с поддержкой проверки правил проектирования и соответствия схемы и топологии.

Для техпроцессов, ориентированных на мощные применения, в некоторых моделях транзисторов реализованы дополнительные выводы к внутренним источникам токов и напряжений, что позволяет анализировать поведение нагрузочной кривой. Для оценки влияния рассеиваемой мощности / температуры кристалла на его характеристики в библиотеках элементов также имеются специализированные слои, позволяющие выполнять тепловые расчеты непосредственно в САПР РЭА.

Также в современной литературе отмечается важность учета в нелинейных моделях ряда динамических эффектов, присущих СВЧ-транзисторам на основе GaN, например эффекта саморазогрева [1] и захвата носителей на ловушках [2].

Пример разработки нелинейной модели с учетом современных требований

В рамках этой работы было проведено построение масштабируемой нелинейной шумовой модели 0,1-мкм GaAs pHEMT с учетом современных требований. Для экстракции параметров модели использовались результаты зондовых измерений матрицы тестовых СВЧ-транзисторов (АО «НПП “Исток” им. Шокина»). Для эффективной работы с большим объемом измерений было разработано ПО, позволяющее формировать базу измеренных данных и обеспечивать взаимодействие целевой САПР с такой базой на отдельных этапах построения модели (визуализации данных, деэмбеддинга, экстракции и верификации). В процессе экстракции параметров модели использовались авторские методики [3]. Модель интегрирована в библиотеку элементов, для нее также была разработана масштабируемая топологическая ячейка с поддержкой проверки правил проектирования и соответствия схемы и топологии.

Заключение

В докладе представлен обзор функциональных возможностей современных моделей СВЧ-транзисторов для САПР РЭА. Продемонстрированы результаты построения масштабируемой нелинейной шумовой модели 0,1-мкм GaAs pHEMT, функциональные возможности которой соответствуют современному уровню развития отрасли.

Литература

1. Chen Y., Xu R., Xu Y. A simplified Angelov self-heating modeling using Short and long duration Pulsed I-V measurement for a GaN HEMT // 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Shanghai, China: IEEE, 2020. P. 1–3.
2. Luo P., Bengtsson O., Rudolph M. A drain lag model for GaN HEMT based on Chalmers model and pulsed S-parameter measurements // 2017 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium — IMS 2017: 2017. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017. P. 240–243.
3. Popov A., Bilevich D., Salnikov A. et al. Automatic large-signal GaAs HEMT modeling for power amplifier design // AEU — International Journal of Electronics and Communications, 2019. Vol. 100. P. 138–143.



УДК 621.3

Обобщение технических требований к устройствам на пластине с копланарной линией передачи при разработке структуры метрологической системы измерений их СВЧ-характеристик

Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Пивак А. В., Раков А. В., Семенов В. А., Чирков И. П.
ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево

Определение основных технических параметров, изготавливаемых и тестируемых устройств на пластине, а также технических параметров материалов, применяемых отечественными предприятиями.

Разработка отечественных калибровочных пластин для зондовых станций, широкополосных измерительных зондов. Создание исходного эталона, обеспечивающего метрологическую прослеживаемость измерений на пластине к государственному эталонам единиц величин.

Ключевые слова: пластина; зонд; зондовая станция; копланарная линия.

При разработке современных микроэлектронных полупроводниковых устройств после получения интегральной структуры на кристалле в целях контроля ее характеристик в СВЧ-диапазоне требуется проводить измерения еще до этапа корпусирования непосредственно на полупроводниковой пластине. Для такого рода измерений используется специальное оборудование — зондовые станции. Зондовые станции оснащены высокоточными позиционерами, на которых располагаются высокочастотные измерительные зонды. Измерительные зонды обеспечивают передачу сигнала от средств измерений со стандартизованными коаксиальными или волноводными соединителями к контактной площадке измеряемого полупроводникового устройства с в широком диапазоне частот.

Особенности распространения СВЧ-поля в измерительном зонде, месте контакта зонда и исследуемого объекта не позволяют получить достоверную оценку измеряемых характеристик, в том числе комплексных коэффициентов отражения и передачи (по-другому S-параметров), без использования специальных калибровочных пластин с расположенными на них мерами.

На протяжении нескольких десятилетий отечественная микроэлектронная отрасль пользовалась описанными выше измерительными системами исключительно иностранного производства. Свои разработки в этой области проводились в крайне недостаточном объеме, в то время как верхняя частота рабочего диапазона как разрабатываемых микроэлектронных устройств, так и применяемого измерительного оборудования постоянно росла.

В последнее время отечественная микроэлектроника оказалась в положении, при котором остро не хватает измерительных зондов и калибровочных подложек. При этом ни методической, ни программной, ни экспериментальной, ни технологической основ к построению метрологического обеспечения такого вида измерений не создавалось.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводятся работы, направленные на обеспечение единства и требуемой точности измерений на пластине в диапазоне частот 0–110 ГГц. В рамках данных исследований проводятся разработки отечественных калибровочных пластин для зондовых станций, широкополосных измерительных зондов, а также создается исходный эталон, обеспечивающий метрологическую прослеживаемость измерений на пластине к государственным эталонам единиц величин.

На начальном этапе работы определены основные технические параметры изготавливаемых и тестируемых устройств на пластине, технические параметры материалов, применяемых отечественными предприятиями с учетом сформированных технологических циклов.

С учетом полученных результатов на сегодняшний день уже созданы прототипы широкополосного измерительного зонда с рабочим диапазоном частот 0–18 ГГц для шага контактов GSG, равного 200 микрон, а также прототип калибровочной пластины с эталонными мерами на копланарных линиях для того же шага контактов, что и у прототипа зонда.

Литература

1. Marks R. B. and Williams D. F. Characteristic impedance determination using propagation constant measurement // IEEE Microwave and Guided Wave Letters, June 1991. Vol. 1. P. 141–143.
2. Arz U. et al. Traceable Coplanar Waveguide Calibrations on Fused Silica Substrates up to 110 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019. Vol. 67. № 6. P. 2423–2432.



УДК 621.396

Преимущества использования элементного базиса SiGe БиКМОП при разработке СФ-блоков быстродействующих микросхем

Савченко Е. М., Пронин А. А., Аредов А. А.

ООО «Центр инновационных разработок ВАО»

107023, г. Москва, Семеновская пл., 1А

На конкретных схемотехнических примерах рассмотрена техническая необходимость применения SiGe БиКМОП-технологического базиса с использованием гетеропереходных биполярных транзисторов для реализации необходимых технических характеристик СФ-блоков быстродействующих микросхем. Произведено сравнение основных параметров блоков при реализации их в КМОП-техбазисе с топологическими нормами 65 нм и SiGe БиКМОП-техбазисе с топологическими нормами 130 нм.

Ключевые слова: SiGe БиКМОП-технологический процесс; СФ-блоки; A^3B^5 ; гетеропереходный биполярный транзистор.

Представлено сравнение основных характеристик ключевых СФ-блоков быстродействующих микросхем при их реализации на SiGe БиКМОП- и КМОП-техбазисе. Показана необходимость в гетеропереходных SiGe биполярных транзисторах, которые в сочетании с хорошими возможностями по интеграции КМОП-технологии имеют преимущества по сравнению с МОП-транзисторами в таких ключевых направлениях создания электронной аппаратуры как:

- системы генерации и распределения СВЧ-сигналов гетеродинных блоков радиоприемных систем и тактовых сигналов высокосортных АЦП/ЦАП (синтезаторы частот на основе ФАПЧ, генераторы — дистрибьютеры тактовых сигналов, буферные усилители — преобразователи тактовых сигналов, фильтры джиттера на основе ФАПЧ);
- блоки радиоприемных трактов (смесители, усилители мощности со средней выходной мощностью);
- входные усилители и буферизирующие усилители тактовых сигналов высокоскоростных АЦП/ЦАП;
- приемо-передатчики проводных высокоскоростных последовательных интерфейсов со скоростью передачи данных более 1 Гбит/с (в том числе оптические).

Большинство из перечисленных направлений могут быть реализованы и на техпроцессах полупроводников группы A^3B^5 (GaAs, GaN, InP), но отсутствие необходимой возможности интеграции в этих техпроцессах с КМОП-устройствами на одной пластине заставляет разработчиков переходить к многокристальным решениям, что усложняет и удорожает аппаратуру [1]. С другой стороны, некоторые из перечисленных направлений могут быть реализованы на КМОП-техпроцессах, но для получения сопоставимых характеристик аппаратуры в области СВЧ необходимо переходить к техпроцессам с проектной нормой менее 65 нм, что сильно удорожает разработку, а также приводит к снижению выходной мощности конечных усилительных каскадов. И, наконец, для части из перечисленных направлений

не представляется возможным применение КМОП-техбазиса в силу физических ограничений МОП-транзисторов по предельнодопустимым рабочим напряжениям и особенностям ВАХ.

Литература

1. Rüdtenklau Uwe. mmWave Semiconductor Industry Technologies: Status and Evolution, ETSI White Paper № 15, Second edition. September 2018.
2. Jagannathan B., Greenberg D. Speed and Power Performance Comparison of State-of-the-Art CMOS and SiGe RF Transistors // 2004 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems.



УДК 621.3.049

Разработка микросхем An4140 и An4259 и технологии изготовления СВЧ КМОП ИС на структурах ультратонкого кремния на сапфире

Кечко И. Е., Кошелева Г. С., Метлов В. А., Романов А. А.

АО «Ангстрем»

122460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3

romanov@angstrom.ru

Представлены результаты разработки первых отечественных СВЧ-микросхем An4140 и An4259 — аналогов микросхем PE4140 и PE 4259 фирмы Murata, pSemi (Peregrine Semiconductor). Микросхемы изготовлены по СВЧ КМОП-технологии на структурах ультратонкого кремния на сапфире. Приведены полупроводниковые структуры компонентов СВЧ КМОП-технологического процесса с проектной нормой 0,5 мкм и результаты сравнения характеристик полученных микросхем с характеристиками зарубежных микросхем.

Ключевые слова: ультратонкий кремний на сапфире; СВЧ КМОП-технология; СВЧ-микросхемы на структурах ультратонкого кремния на сапфире.

Одним из способов создания СВЧ КМОП ИС является использование структур ультратонкого кремния на сапфире. Данный способ позволяет соединить производство СВЧ ИС с технологическим процессом, близким к стандартному КМОП-процессу на кремнии, и избежать в некоторых случаях использования дорогостоящих эпитаксиальных структур A^3B^5 .

В работе представлены результаты разработки первых отечественных СВЧ-микросхем An4140 и An4259 — аналогов микросхем PE4140 и PE 4259 фирмы Murata, pSemi (Peregrine Semiconductor). Микросхемы изготовлены по СВЧ КМОП-технологии на структурах ультратонкого кремния на сапфире.

Показаны параметры полностью отечественных гетероструктур ультратонкого 100-нм слоя кремния на подложках сапфира диаметром 150 мм, изготовленных АО «НИИМВ» и АО «Эпиэл», г. Зеленоград [1, 2]. СВЧ КМОП-технологический процесс разработан АО «Ангстрем» и включает следующие полупроводниковые структуры:

- толщина приборного слоя кремния 100 нм;
- проектная норма 0,5 мкм;
- нормально закрытые N-канальные транзисторы с минимальной длиной канала 0,5 мкм для логических схем с низким потреблением;
- нормально закрытые P-канальные транзисторы с минимальной длиной канала 0,5 мкм для логических схем с низким потреблением;
- нормально открытые N-канальные транзисторы с минимальной длиной канала 0,5 мкм для применения в СВЧ-каналах;
- конденсаторы Poly/Me1/Me2 (цифроаналоговые схемы);
- высокоомные резисторы 1 кОм (цифроаналоговые схемы);
- толщина затворного диэлектрика 9 нм;
- три уровня металлической разводки.

Процесс позволяет получить на одном кристалле цифроаналоговую и СВЧ-опции.

Для аттестации такого способа получения СВЧ КМОП ИС АО «Ангстрем» разработаны и изготовлены две микросхемы:

- Ап4140 — широкополосный 4-транзисторный смеситель частоты с широким динамическим диапазоном, способный работать на частоте до 6000 МГц, корпус DFN6;
- Ап4259 — двухканальный радиочастотный переключатель поглощающего типа, предназначенный для широкого спектра применений в диапазоне от 10 до 3000 МГц, корпус DFN6.

Показаны результаты сравнения характеристик полученных микросхем и их зарубежных прототипов.

Литература

1. Федотов С. Д., Стаценко В. Н., Егоров Н. Н., Голубков С. А. Влияние твердофазной рекристаллизации с двойной имплантацией на плотность структурных дефектов в ультратонких слоях кремния на сапфире // Физика твердого тела, 2019. — Т. 61. — Вып. 12. — С. 2349–2359.
2. Федотов С. Д., Егоров Н. Н., Голубков С. А., Стаценко В. Н., Романов А. А., Метлов В. А. Изучение подвижности электронов и ВАХ полевых транзисторов в зависимости от структурных и электрофизических характеристик ультратонкого кремния на сапфире // Наноиндустрия, 2019. — № S89. — С. 589–590.



УДК 621.382

Разработка усилителя с контролируемым коэффициентом усиления на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии для приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона

Коколов А. А., к. т. н., Ходжиков Д., Бабак Л. И., д. т. н.

*Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
andrei.a.kokolov@tusur.ru*

Представлены результаты разработки 4-битного усилителя с контролируемым усилением на основе отечественной 90-нм РЧ КМОП-технологии для диаграммообразующей схемы приемо-передающего модуля АФАР X-диапазона. Коэффициент усиления составляет 11 дБ, шаг ослабления — 0,5 дБ, выходная мощность — не менее 7 дБм, СКО амплитудной ошибки — 0,25 дБ и СКО фазовой ошибки — менее 5 градусов.

Ключевые слова: КМОП; VGA; усилитель; X-диапазон.

В настоящее время за рубежом широко распространен подход, при котором функции контроля амплитуды и фазы для управления лучом в приемо-передающих модулях (ППМ) АФАР выполняют многоканальные диаграммообразующие ИС (ДИС) на основе кремниевых технологий (SiGe, КМОП, КНИ) [1]. К достоинствам такого решения относятся меньшие габариты и энергопотребление, а также возможность на одном чипе сделать ДИС для нескольких каналов, включая цифровые схемы управления. В [2] было показано, что на базе отечественной 90-нм РЧ КМОП-технологии могут быть реализованы ИС усилителей, цифровых фазовращателей и аттенюаторов X-диапазона для ППМ АФАР.

Обычно для управления амплитудой сигнала в ДИС применяются цифровые аттенюаторы. Однако в последнее время начали разрабатываться схемы ДИС, в которых используется усилитель с контролируемым коэффициентом усиления (УКУ), который сочетает в себе функции буферного усилителя и цифрового аттенюатора. Достоинством такого решения является уменьшение площади чипа, количества площадок питания и управления, а также увеличение динамического диапазона.

В докладе рассматривается разработка УКУ X-диапазона на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии. В качестве основы используется каскодная схема с токовым управлением коэффициента усиления при помощи шунтирующих транзисторов [1]. При такой схеме включения параметры УКУ (согласование по входу/выходу, выходная мощность, коэффициент шума) практически нечувствительны к переключению усиления, также можно достичь низких значений СКО фазовой ошибки. Однако при увеличении разрядности более 3 бит и, соответственно, диапазона изменения усиления возникает большая неравномерность в управлении амплитудой, что приводит к увеличению СКО амплитудной ошибки. Для преодоления данного недостатка нами предложена схема управления, которая регулирует ток, протекающий через усилительные транзисторы, за счет добавления дополнительных корректирующих транзисторов.

В результате был разработан 4-битный УКУ диапазона 8–12 ГГц со следующими характеристиками: коэффициент усиления в опорном состоянии 11 дБ, шаг ослабления 0,5 дБ, максимальное ослабление 7,5 дБ, коэффициенты отражения по входу/выходе не более –9 дБ, выходная мощность не менее 7 дБм, СКО амплитудной ошибки 0,25 дБ и СКО фазовой ошибки менее 5 градусов. Суммарный ток потребления не превышает 22 мА при напряжении питания и управления 2,5 В. Размер кристалла вместе с площадками управления и подачи питания составляет 0,9 мм².

Работа выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор FEWM-2022-0006)

Литература

1. Shin D., Rebeiz G. M. A High-Linearity-Band Four-Element Phased-Array Receiver: CMOS Chip and Packaging // IEEE Trans. Microw. Theory Tech., August 2011. Vol. 59. № 8. P. 2064–2072.
2. Бабак Л. И., Панасенко П. В., Коколов А. А., Помазанов А. В., Шутов Е. С., Коряковцев А. С., Федоров Е. А., Шеерман Ф. И. Комплект диаграммообразующих СВЧ ИС для приемо-передающих модулей X-диапазона с АФАР на основе отечественной 90 нм КМОП-технологии // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № 4 (99). — С. 421–422.



УДК 621.317

Применение метода последовательных приближений как средства автоматического поиска оптимальных режимов работы измеряемого устройства

Караванов И. М., Медвехкв Н. С., Сметанин В. В.

ООО «НПП «ПРИМА»

603950, г. Нижний Новгород, Сормовское ш., 1Ж

karavanov-im@prima.nnov.ru, medvekhkv-ns@prima.nnov.ru,

smetanin-vv@prima.nnov.ru

Рассмотрена проблема поиска оптимальных режимов работы устройств с большим количеством выводов управления. Приведен анализ измерений реального устройства. Предложен алгоритм адаптивного поиска рабочих режимов. Показаны результаты работы алгоритма на реальном устройстве.

Ключевые слова: зондовые измерения; оптимальный режим; автоматизация измерений; адаптивный алгоритм; монолитная интегральная схема; программное обеспечение.

Измерение электрических параметров устройств является неотъемлемой частью процесса разработки. Не менее важно измерять основные характеристики отдельных устройств в составе модуля для оптимальной настройки системы в целом. Измерение устройств с большим количеством выводов управления и несколькими режимами работы является трудоемкой задачей. Особенно это критично, когда измерения проводятся в ручном режиме, где оператору необходимо менять условия измерения и обрабатывать полученные результаты. Поиск оптимальных режимов работы устройств с большим количеством выводов управления с помощью обычного перебора всех управляющих напряжений занимает большое количество времени.

Решить задачу поиска оптимальных режимов работы устройств можно с помощью автоматизации измерений, но и в этом случае необходимо вмешательство оператора, чтобы обрабатывать результаты измерений и на их основе создавать следующее измерение. Можно разработать алгоритм, по которому программа, отвечающая за автоматические измерения, будет по заданным критериям подбирать управление таким образом, чтобы выходные характеристики устройства соответствовали заданным.

В статье приводится анализ измерений активного дифференциального фазовращателя на нитриде галлия и предлагается адаптивный подход к поиску его рабочих режимов. Фазовращатель относится к векторному типу, что позволяет устанавливать фазу с высокой точностью, а также имеет несколько управляющих выводов, что усложняет поиск рабочих режимов. Предлагаемый адаптивный алгоритм поиска рабочих режимов позволяет снизить временные затраты и повысить точность результатов поиска.

УДК 621.317

Увеличение емкости представляемой информации об СВЧ-измерениях посредством автоматического выпуска интерактивной документации**Сметанин В. В., Медвехкв Н. С.**

ООО «НПП «ПРИМА»

603950, г. Нижний Новгород, Сормовское ш., 1Ж

smetanin-vv@prima.nnov.ru, medvekhkv-ns@prima.nnov.ru

Обозначены проблемы, связанные с недостаточной полнотой документирования характеристик ЭКБ. Проведен анализ причин ограниченного представления информации. Предложены способы решения проблем и приведен пример практической реализации выпуска интерактивной документации в автоматическом режиме.

Ключевые слова: техническая спецификация; паспорт изделия; интерактивная документация; автоматический выпуск документации; автоматизация измерений; СВЧ-измерения; программное обеспечение.

Процесс измерения характеристик ЭКБ неразрывно связан с последующим выпуском комплекта сопроводительной документации на измеряемое устройство. Выпущенная документация является источником информации, влияющим на выбор ЭКБ для применения в РЭА и формирующим ожидания к ее характеристикам. Разработчики сталкиваются с проблемами, связанными с недостаточной полнотой информации для корректной ее интерпретации при решении задач по разработке РЭА с прогнозируемыми характеристиками в широком диапазоне рабочих режимов. Особенно остро стоит вопрос об СВЧ-изделиях. Следование рекомендациям эксплуатационно-технической документации при взаимодействии с СВЧ ЭКБ не всегда приводит к работоспособности устройства в соответствии с расчетными характеристиками.

Проблема неполноты информации в сопроводительной документации по измерениям имеет ряд причин. Одна из них — отсутствие измерений и документирования характеристик при разных условиях эксплуатации. Стандартного подхода с приведением в документации целевых параметров измеряемого устройства только при нормальных условиях или в точках максимальной и минимальной температуры не всегда достаточно. Для предсказуемой работы изделия необходима информация о целевых характеристиках ЭКБ в широком диапазоне температур. Другая причина — редкое использование индивидуального подхода к измерениям и документированию характеристик, что оказывает негативное влияние при производстве изделий, где существует потребность подбора комPLEMENTАРНЫХ пар ЭКБ.

В статье проводится анализ причин, которые приводят к проблеме недостаточной полноты информации о характеристиках ЭКБ, в частности, для СВЧ-изделий. Предлагается переход на гибридный бумажно-электронный формат документации с возможностью выборочного или интерактивного представления данных. Определяется процесс, в рамках которого подготовка и проведение СВЧ-измерений глубоко интегрированы с подготовкой и выпуском сопроводительной документации. Описывается опыт практической реализации решения задачи формирования сопроводительной документации необходимого объема с помощью САПР автоматических измерений. Приводятся возможные для автоматического выпуска комплект документации и эффект от внедрения решения.



УДК 621.317

Разработка отечественных ваттметров СВЧ-диапазона для испытаний и настройки приемо-передающих устройств

Малай И. М., Матвеев А. И., Семенов В. А., Чирков И. П.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево

Разработка и область применения измерителя мощности термисторного унифицированного М3-121, ваттметра поглощаемой мощности М3-122, ваттметра поглощаемой мощности М3-123. Разработка ваттметров на основе МЭМС-датчиков.

Ключевые слова: ваттметр поглощаемой мощности; измеритель мощности; преобразователь мощности; термистор.

Мощность электромагнитных колебаний и параметры СВЧ-трактов являются одними из основных параметров, характеризующих отдельные узлы и устройства радиотехнических систем. Целью ФГУП «ВНИИФТРИ» в этом направлении измерений является создание доступной потребителю системы средств и методов контроля мощности сигналов, в том числе в миллиметровом диапазоне длин волн, в котором сосредоточены перспективные работы и наукоемкие технологии по созданию изделий радиоэлектронной промышленности, компонентной базы нового поколения.

Решение научной проблемы по разработке единой системы метрологической прослеживаемости измерений мощности электромагнитных колебаний путем формирования теоретически обоснованной научно-методической базы и созданию на ее основе методически соединенных первичного эталона и ваттметров осуществляется в рамках целого комплекса по созданию рабочих эталонов и средств измерений мощности. В этом году запланировано проведение испытаний в целях утверждения типа четырех средств измерений мощности с диапазоном частот от 5,64 до 170 ГГц. Отдельного внимания заслуживает уточнение, что СВЧ электронно-компонентная база для производства преобразователей мощности разработана ФГУП «ВНИИФТРИ» и частично тут же и выпускается.

Для плавного перехода отечественных предприятий, эксплуатирующих термисторные измерители мощности, разработан измеритель мощности термисторный унифицированный М3-121. Он предназначен для измерения средней мощности непрерывных и импульсно-модулированных электромагнитных колебаний с термисторными преобразователями мощности в диапазоне частот от 0,02 до 78,33 ГГц. В отличие от применяемых ранее измерителей, прибор поддерживает удаленное управление по интерфейсу USB 2.0, обеспечивает непрерывную передачу данных измерений и гибкую настройку рабочих параметров устройства, в том числе изменение рабочего сопротивления моста.

Следующая разработка — ваттметр поглощаемой мощности М3-122, который применяется в области системы обеспечения единства измерений мощности электромагнитных колебаний при разработке и градуировке СВЧ-устройств. Принцип действия ваттметра основан на эквивалентности по тепловому воздействию измеряемой СВЧ-мощности, падающей на вход преобразователя, и мощности постоянного тока, рассеиваемой в нем. Процесс замещения мощности СВЧ-колебаний

мощностью постоянного тока осуществляется в многозондовом термисторном СВЧ-датчике. Изменением сопротивлений термисторов осуществляется регулировка КСВН входа [1]. Ваттметр комплектуется волноводными преобразователями с диапазонами частот от 16,7 до 26 ГГц и от 26 до 37,5 ГГц.

Ваттметр поглощаемой мощности М3-123 является высокоточным средством измерения мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот свыше 37,5 ГГц в волноводных трактах. Преобразователь мощности [4], включающий отрезок прямоугольного волновода и V-образную нагрузку с омическими контактами на ее концах, отличается тем, что преобразующий элемент, одновременно являющийся термочувствительным элементом и поглотителем электромагнитной энергии, выполнен из монокристаллического полупроводника [2].

Перспективной в настоящее время разработкой являются ваттметры на основе МЭМС-датчиков. Компактные размеры преобразователей и высокая чувствительность к изменению температуры теоретически позволяют создавать сверхширокополосные преобразователи мощности с диапазоном рабочих частот от единиц кГц до сотен ГГц. В настоящее время разработана конструкция макета преобразователя на основе копланарной линии передачи, совмещающей СВЧ-нагрузку и МЭМС-преобразователь в едином чипе.

Литература

1. Матвеев А. И., Перепелкин В. А. Эталоны-переносчики мощности СВЧ в волноводных трактах на основе многозондовых преобразователей // Альманах современной метрологии, 2019. — № 2 (18). — С. 65–72.
2. Коудельный А. В., Малай И. М., Матвеев А. И., Перепелкин В. А., Чирков И. П. Разработка комплекса аппаратуры для измерения мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц // Альманах современной метрологии, 2021. — № 2 (26). — С. 25–36.



УДК 621.389

Особенности микрополосковой СВЧ-нагрузки высокого уровня мощности для ферритовых вентилей

Семенов Д. А., Сквородников С. В.

ООО «СДС Электроникс»

192241, г. Санкт-Петербург, ул. Софийская, 66

sds@sds-e.net

В статье представлены результаты разработки, измерения и испытания на ВУМ микрополосковой нагрузки высокого уровня мощности для ферритовых вентилей на С-диапазон.

Ключевые слова: нагрузка; ферритовый вентиль; СВЧ; высокий уровень мощности; электронные компоненты.

Одной из задач при разработке СВЧ-устройств высокого уровня мощности является отвод паразитной (отраженной, некоммутируемой) мощности. Зачастую это решается установкой в модули переключателей или циркуляторов с балластной нагрузкой или ферритового вентиля, в состав которого входит нагрузка. Данные нагрузки должны обладать рядом свойств: минимальный КСВН при сопряжении с узлами СВЧ-трактов, длительная наработка при повышенных температурах, качественный теплосъем.

Одним из решений для микрополосковых СВЧ-приборов является нагрузка, представленная в работе [2]. На основе данной конструкции была разработана нагрузка для вентиля С-диапазона. Качественным отличием данной нагрузки является смещение области поглощения СВЧ-мощности по площади нагрузки для предотвращения перегрева ферритового диска вентиля.

Для изготовления использованы стандартные технологические процессы вакуумного напыления и фотолитографии.

В рамках данной работы был разработан ферритовый микрополосковый циркулятор в С-диапазоне со следующими параметрами: вносимые потери $\leq 0,3$ дБ, развязка ≥ 20 дБ, КСВН $\leq 1,3$, отраженная мощность в нагрузку не менее 100 Вт. Перегрев локальных областей нагрузки с сохранением заданных параметров ≈ 80 °С.

Литература

1. Лакс Б. и Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики / перевод с английского под редакцией А. Г. Гуревича. — М.: Мир, 1965 г.
2. Сквородников С. В. Интегрированная микрополосковая нагрузка повышенного уровня СВЧ мощности // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — СПбГЭТУ, 4–7 июня 2012 г.

УДК 621.382

Исследование и разработка квадратурного модулятора с регулируемым коэффициентом передачи

Калёнов А. Д.^{1,2}¹ АО «НИИМА «Прогресс»

125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

a.kalyonov@i-progress.tech

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлены результаты проектирования квадратурного модулятора с регулируемым 6-битным аттенуатором. Для улучшения динамического диапазона используется мостовая схема аттенуатора с компенсацией паразитного сигнала. Работа выполнена с использованием отечественной технологии КМОП.

Ключевые слова: квадратурный модулятор; аттенуатор; КМОП; СВЧ.

Современные системы связи, такие как WCDMA, требуют высоких скоростей передачи данных и очень широкополосной амплитудной модуляции. Существует два основных метода амплитудной модуляции радиочастотного сигнала. Одним из них является модуляция тока, которая модулирует выходную амплитуду путем управления током смещения выходного усилителя. Модуляция тока обеспечивает превосходную полосу пропускания амплитудной модуляции, но линейность сигнала ограничена выходным усилителем и током потребления. По сравнению с модуляцией тока подход с модуляцией напряжения обеспечивает высокую линейность выходной мощности в широком диапазоне частот при низком потреблении тока.

Ток утечки гетеродина при низкой выходной мощности является серьезной проблемой при проектировании квадратурного модулятора. Для достижения достаточного качества сигнала при низкой выходной мощности функции амплитудной модуляции и регулирования мощности должны быть разделены. В работе предлагается высокоэффективный квадратурный модулятор с регулируемым аттенуатором, который обладает высокой линейностью выходного сигнала и большим диапазоном регулирования выходной мощности. Динамический диапазон квадратурного модулятора предназначен только для модуляции сигнала, а динамический диапазон дифференциального аттенуатора предназначен только для регулирования уровня выходной мощности. Разделяя функции амплитудной модуляции и регулирования мощности, можно достичь достаточного динамического диапазона для обеих функций. Двойной режим в квадратурном модуляторе увеличивает динамический диапазон и снижает потребление постоянного тока при низкой выходной мощности.

Диапазон регулирования в 32 дБ с шагом регулирования в 0,5 дБ достигается с помощью пассивного дифференциального аттенуатора с компенсацией паразитного сигнала, а дополнительный диапазон регулирования достигается с помощью управления режимом в квадратурном модуляторе. Использование мостовой схемы аттенуатора расширяет функциональные возможности изделий, выполненных по КМОП-технологии: снижение потерь при прямом прохождении сигнала, снижение разницы в погрешностях установления коэффициента ослабления для



разных разрядов, расширение полосы рабочих частот. При построении переключателя используются дифференциальные мостовые схемы, которые позволяют, во-первых, уменьшить влияние паразитных составляющих, связанных с общей шиной, и, во-вторых, использовать эффект компенсации. Цифровое управление предложенным аттенуатором может быть обеспечено за счет блока управления, преобразующего цифровые коды в требуемые значения напряжений переключения транзисторов.

Описанный способ позволяет управлять мощностью выходного сигнала и подавлять несущую в спектре выходного сигнала. Управление токами возможно с помощью цифрового блока.

Структурная схема разработанного квадратурного модулятора с регулируемым коэффициентом передачи с диапазоном рабочих частот от 100 МГц до 1 ГГц приведена на рис. 1.

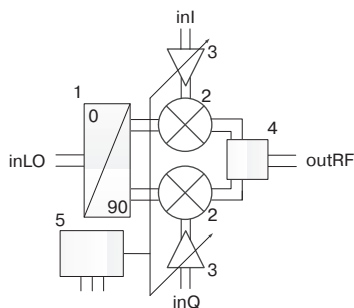


Рис. 1. Структурная схема квадратурного модулятора: 1 — генератор квадратурных сигналов с усилителями-ограничителями, 2 — смесители, 3 — входные каскады с аттенуаторами, 4 — выходной блок, 5 — цифровой блок управления

Авторы считают, что новыми в данной работе являются использованные архитектурные, схемотехнические и конструктивно-топологические решения при разработке квадратурного модулятора с регулируемым коэффициентом передачи.

Результаты проектирования показывают, что рабочая частота квадратурного модулятора с дифференциальным аттенуатором, разработанного по отечественной технологии КМОП 180 нм, составляет 100 МГц — 1 ГГц, коэффициент передачи — не менее 0 дБ, линейность выходного сигнала — не менее 7 дБм, шаг ослабления — 0,5 дБ и ток потребления — не более 120 мА.

УДК 681.7.062.2

Разработка микрозеркала с высокоаспектным встречно-штыревым актюатором на базе технологии «кремний на стекле»

Баклыков Д. А.^{1,2}, Стукалова В. Е.², Соловьев А. А.^{1,2}, Третьяк А. С.²,
Константинова Т. Г.², Башинова М. В.², Родионов И. А.^{1,2}

¹ ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова»

127030, г. Москва, ул. Суцневская, 22

² МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

irodionov@bmstu.ru

В работе представлены аналитические расчеты и моделирование конструкции рамы и электростатических актюаторов микросканирующего зеркала. Показаны технологические возможности и особенности, а также ограничения технологии «кремний на стекле». Представлены макетные образцы различных типов микрозеркал.

Ключевые слова: МЭМС; микрозеркало; Bosch-процесс; встречно-штыревые структуры; электростатический актюатор; кремний на стекле; высокоаспектные каналы.

Использование емкостной связи для актюации и считывания является одним из самых распространенных методов преобразования энергии в МЭМС-устройствах благодаря относительно простой конструкции, быстрому времени отклика и низкому энергопотреблению [1]. Возможность реализации на одном уровне всех необходимых функций устройства (привод, анкера, упругие элементы, контакты) без необходимости формирования многослойных структур с многоступенчатым профилем и сложным технологическим маршрутом стала толчком к развитию микросистем на встречно-штыревых системах и создала целую группу встречно-штыревых МЭМС: датчиков магнитного поля, резонаторов и осцилляторов, ВЧ-переключателей, биосенсоров, датчиков влажности, микропозиционеров, интегральных фотонных МЭМС, адаптивной оптики, оптических переключателей и аттенуаторов, микроманипуляторов, акселерометров и гироскопов [2–6].

Микросканирующее зеркало (рис. 1б) является одним из наиболее популярных МЭМС-устройств на встречно-штыревых структурах и применяется в оптических коммутационных системах, LiDAR-системах, дисплеях, ИК-спектрометрии, эндоскопии и метрологии. Основными элементами микрозеркала являются основание, корпус, контакты (электроды), зеркало (рис. 1а) и микропривод (актюатор), особенностью которого является расположение подвижных и неподвижных гребней на разных уровнях для обеспечения поворота (рис. 1б, в).

В работе проведено математическое моделирование механических характеристик привода на базе емкостных встречно-штыревых структур, проведена оценка влияния технологических ограничений на свойства системы и выходные характеристики устройств. Разработана технология формирования конструктивных элементов микросканирующих зеркал на базе кремний — изолятор, обеспечивающая бездефектный профиль на границе с диэлектриком, аспектное отношение

более 10 с углом профиля $90 \pm 1^\circ$ для структур шириной от 5 до 1000 мкм и равномерность не хуже 5% по 100-мм пластине.

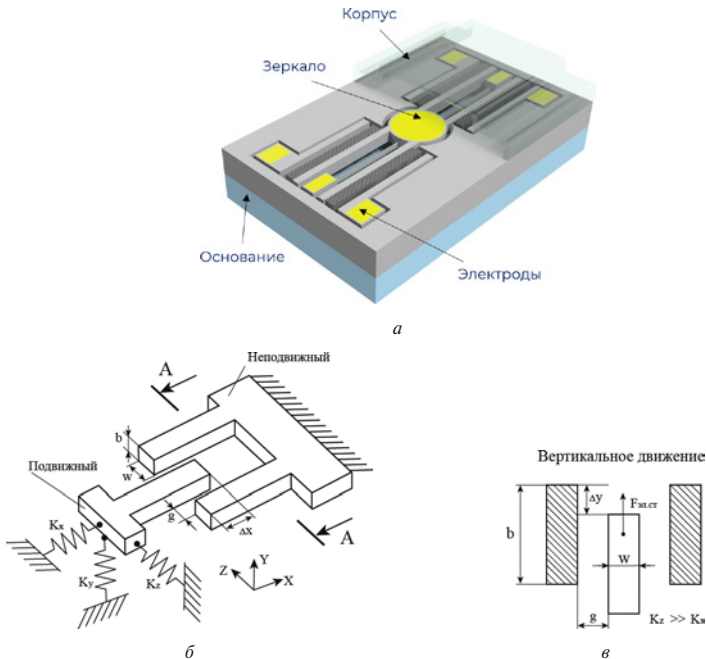


Рис. 1. Микросканирующее зеркало: а) основные элементы; б) встречно-штыревой актуатор; в) актуатор в сечении (А-А)

Литература

1. Algamili A. S. et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices // *Nanoscale research letters*, 2021. Vol. 16. № 1. P. 1–21.
2. Lin L., Howe R. T., Pisano A. P. Microelectromechanical filters for signal processing // *Journal of Microelectromechanical systems*, 1998. Vol. 7. № 3. P. 286–294.
3. Langfelder G., Bestetti M., Gadola M. Silicon MEMS inertial sensors evolution over a quarter century // *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021. Vol. 31. № 8. P. 084002.
4. Stepanovsky M. A comparative review of MEMS-based optical cross-connects for all-optical networks from the past to the present day // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019. Vol. 21. № 3. P. 2928–2946.
5. Belfiore N. P., Bagolini A., Rossi A., Bocchetta G., Vurchio F., Crescenzi R. and Sciuto S. A. (2021). Design, fabrication, testing and simulation of a rotary double comb drives actuated microgripper // *Micromachines*, 12 (10), 1263.
6. Errando-Herranz C. et al. MEMS for photonic integrated circuits // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019. Vol. 26. № 2. P. 1–16.

УДК 681.586.773

Опыт разработки микромеханических датчиков физических величин**Блинов Н. Н.***АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова»
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 145
nn.blinov@yandex.ru***Ключевые слова:** микроэлектромеханические устройства; датчики давления.

Сенсоры, преобразующие давление или силу в электрический сигнал, определяют важнейшие характеристики датчика давления — стабильность параметров, метрологические характеристики, прочность и устойчивость к перегрузке и ВВФ.

В докладе рассматриваются технологические особенности технологии «кремний на сапфире» применительно к датчикам физических величин.

В технологии «кремний на сапфире» исходной структурой для формирования сенсора является пластина (подложка) из монокристаллического сапфира, на поверхности которой технологическими методами микроэлектроники (эпитаксия, окисление, ионная имплантация, фотолитография, металлизация) групповым способом формируются кристаллы с мостовой схемой типа «мост Уитстона» из кремниевых тензорезисторов, подключенных к контактным площадкам.

После финишного контроля параметров и резки пластины каждый из отделенных кристаллов со сформированной структурой сенсора припаивается по специальной технологии к титановой мембране, которая лазерной сваркой крепится к корпусу тензопреобразователя.

Топология резистивной мостовой схемы на кристалле и титановая мембрана имеют разную конфигурацию и толщину в зависимости от предела величины измеряемого давления и требований к перегрузке. Электрическая схема сенсора выполнена по схеме «мост Уитстона». Все резисторы моста являются чувствительными к воздействию физической величины.

Топология кристалла с мостовой схемой выполнена таким образом, что при воздействии физической величины (ФВ) сопротивление резисторов одного плеча возрастает, а сопротивление резисторов другого плеча уменьшается (разбаланс моста) и в диагонали моста появляется выходной сигнал, пропорциональный величине воздействующей физической величины.

Литература

1. Вавилов В. Д., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. Микросистемные датчики физических величин. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 550 с.



УДК 681.586.773

Применение пассивных беспроводных акустоэлектронных датчиков

Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А.

АО «НПП «Радар ммс»

197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А

bogoslovsky_sv@radar-mms.com

Ключевые слова: поверхностные и объемные акустические волны; пассивные беспроводные датчики.

Одной из современных перспективных тенденций экономического развития является использование достижений акустоэлектроники (устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и объемных акустических волнах (ОАВ)) для идентификации и измерений состояний природных объектов и процессов их изменений при создании комплексных систем мониторинга и автоматизации технологических процессов. В качестве чувствительного элемента во многих случаях используют либо линии задержки, либо резонаторы на ПАВ, как правило, одноходовые резонаторы. ПАВ-технология позволяет наделить многие устройства конкурентоспособными техническими характеристиками: высокой чувствительностью, точностью, малыми габаритами, переносимостью, прочностью и пониженным старением. Экономические показатели производства ПАВ-изделий также обеспечивают их конкурентоспособность, так как для изготовления используются хорошо отработанные процессы фотолитографии.

Генерация акустических волн может осуществляться различными способами: пьезоэлектрическими, магнитострикционными, оптическими и термическими [1–5]. Однако наиболее эффективными из них в решении задач идентификации и измерений (в радиометках и датчиках) оказались способы, использующие пьезоэлектрический и магнитострикционный эффекты, позволяющие создавать пассивные (без собственных источников питания) беспроводные устройства.

Эффективность эксплуатации пассивных ПАВ-устройств обеспечивается в условиях экстремальных воздействий, тепловых и ионизирующих, если они удовлетворяют требованиям заказчика по дальности считывания информации. Пассивные ПАВ-устройства оказываются существенно дешевле их конкурентов, не требуют профилактического обслуживания, в том числе источников питания в месте установки, и не наносят существенного ущерба окружающей среде.

В настоящее время серийным выпуском датчиков на ПАВ занято несколько зарубежных фирм: Vectron International и Qualtre Inc. (США), Sensor Technology Ltd., Transense Technologies plc (Великобритания), SENSeOR SAS (Франция), NanoTemper Technologies GmbH и Althen GmbH Mess- und Sensortechnik (Германия).

К преимуществам акустоэлектронных датчиков можно отнести:

- измерения контролируемых параметров в широком диапазоне значений;
- получение результатов измерений в ходе технологического процесса;
- высокую чувствительность к вибрациям и к движению в контролируемой среде;
- малые размеры;

- отсутствие движущихся частей;
- устойчивость к коррозии;
- возможность работы в агрессивных средах с температурой до 250 °С;
- большой срок службы;
- простую технологию монтажа в разных звеньях технологической цепочки;
- отсутствие операций калибровки и обслуживания при эксплуатации;
- относительно низкие цены.

Разработчики систем мониторинга имеют возможность выбора из достаточно широкой номенклатуры датчиков физических величин. ПАВ-датчики являются беспроводными, пассивными (не содержат элементов электропитания) и пригодны для измерений в условиях повышенной радиации. Слабым местом этих датчиков, как и всех радиолокационных систем гражданского применения, является низкая разрешенная мощность излучаемых считывателями запросных сигналов, что ограничивает и достижимую дальность считывания сигналов ПАВ-датчиков. Однако за счет достижений в обработке информации, производительности вычислительных средств, построении радиолокационных систем, создании беспилотных летательных аппаратов удается увеличить дальность считывания сигналов ПАВ-датчиков.

Литература

1. Пассивные беспроводные датчики и радиометки на принципах функциональной электроники / под редакцией Анцева И. Г. — М.: Наука, 2021. — 518 с.
2. Ivan Antsev, Sergei Bogoslovsky, Alexander Shvetsov, Sergei Zhgoon, Gennadiy Sapozhnikov, Konstantin Trokhimets, Mikhail Derkach. SAW Temperature Sensor on Quartz // Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. Vol. 62. № 6, JUNE 2015. P. 1066–1075.
3. Takai T., Iwamoto H., Takamine Y., Fuyautsume T., Nakao T., Hiramoto M., Toi T., Koshino M. I. H. P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited) // Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 6–9 Sept. 2017. P. 1–8.
4. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук, 2005. — Т. 175. — № 8. — С. 887–895.
5. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования: монография / под ред. Ю. В. Гуляева. — М.: Радиотехника, 2012. — 576 с.

УДК 621.3.049.76

Конструкция и технология изготовления многоуровневой сборки 3D-микросистемы цифровой части ЛЧМ-радара с торцевой коммутацией

Вертянов Д. В.^{1,2}, Сидоренко В. Н.², Жумагали Р. Н.¹, Беляков И. А.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

vdv.vertyanov@gmail.com, vitaly@microsborka.ru

В работе рассмотрены особенности конструкции и технологии изготовления 3D-микросистемы с торцевой коммутацией на примере цифровой части ЛЧМ-радара. Представлено сравнение трехмерного исполнения изделия в виде двумерных микросборок и в виде электронных модулей с корпусными компонентами.

Ключевые слова: система в корпусе; миниатюризация; трехмерная интеграция; коммутационные подложки; корпусирование; микросистема.

Введение

Современные технологии изготовления коммутационных подложек и монтажа компонентов позволяют добиться максимального уровня миниатюризации электронных устройств. Однако использование этих подходов требует значительных затрат времени и средств. Потому их реализуют не для всего устройства или ячейки, а для какой-то их функциональной части, характеризующейся универсальностью применения. Результатом становится самостоятельный электронный компонент, называемый системой в корпусе (СвК) [1].

При изготовлении СвК может использоваться множество нестандартных подходов из разных областей микроэлектроники. В связи с этим при изготовлении СвК, особенно в трехмерном исполнении, имеет место ряд особенностей и проблем, не характерных для традиционных технологий.

В рамках данной работы эти особенности и проблемы рассмотрены на примере трехмерной СвК цифровой части ЛЧМ-радара. Также в работе приводится сравнение по массогабаритным параметрам конечного изделия в виде единой 3D-микросистемы с двумя промежуточными вариантами. В первом варианте устройство представлено в виде четырех печатных плат с корпусными компонентами, а во втором — в виде четырех двумерных микросборок с бескорпусными кристаллами.

Описание конструкции и технологии изготовления 3D-микросистемы цифровой части ЛЧМ-радара

Итоговая конструкция трехмерной микросистемы с торцевой вертикальной коммутацией, рассматриваемая в работе, содержит четыре уровня в виде коммутационных подложек, на которых смонтированы бескорпусные микросхемы (рис. 1).

Микросистема герметизирована посредством монолитизирующего эпоксидного компаунда. Соединения между уровнями реализованы с помощью вертикальных медных проводников торцевой коммутации.

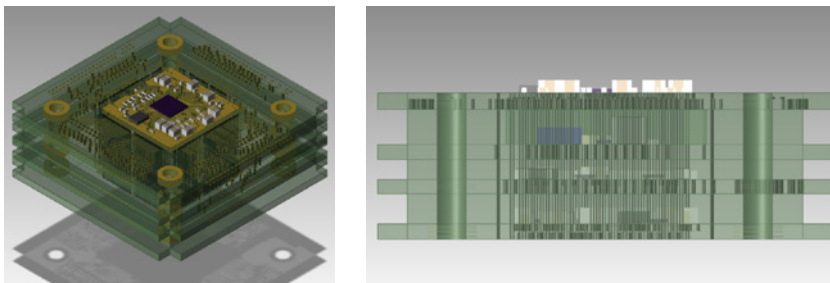


Рис. 1. Проект многоуровневой 3D-микросистемы цифровой части ЛЧМ-радар в системе автоматизированного проектирования

Первые проблемы изготовления микросборки были отмечены на этапе проектирования. Они связаны с малыми топологическими нормами, характерными для двух плат уровней. Значения зазоров между элементами коммутации в этих подложках составляют 40 и 20 мкм, а минимальные размеры элемента коммутации равняются 50 мкм при минимальном диаметре отверстия в 30 мкм. Подобные нормы обусловлены малым шагом контактных площадок монтируемых на уровни кристаллов.

Проблемы решены путем использования в процессах литографии жидкого фоторезиста, наносимого окунанием, а также путем применения плазмохимического травления диэлектрика для получения глухих отверстий между слоями.

Еще четыре проблемы выявлены в ходе отработки техпроцесса на тестовых структурах микросборок. Первая из них связана с пористостью герметизации, вторая — со смещением плат при герметизации по оси Z, третья — со смещением отдельных слоев в стеке подложек уровней при изготовлении. Четвертая проблема заключается в обеспечении требуемой адгезии медной металлизации к компаунду на торцевых гранях микросистемы, а также в предотвращении металлизации основания сборки, содержащего выходные контакты.

Первая проблема решена путем модификации частиц наполнителя, вводимых в герметизирующий компаунд, и изменения процесса герметизации. Решением второй проблемы стало использование жестких колец из металла, задающих при герметизации высоту межуровневого пространства. Третья проблема решена путем модификации конструкции микросборки. Проблема адгезии металлизации решена путем использования раствора промотора адгезии и особого медленного раствора металлизации. Для защиты нижней грани использовался фоторезист.

Особые трудности при отработке были связаны с совмещением торцевых контактов и рисунка торцевых проводников (после металлизации сборки контакты закрыты металлизацией). Предложено два способа преодоления этих трудностей. Первый предполагает формирование реперов до металлизации в слое химически стойкой маски или фоторезиста. Второй основан на формировании реперов с помощью лазерного удаления материала.

В результате объем итоговой трехмерной микросистемы уменьшился в пять раз относительно версии на основе двумерных микросборок (рис. 2).

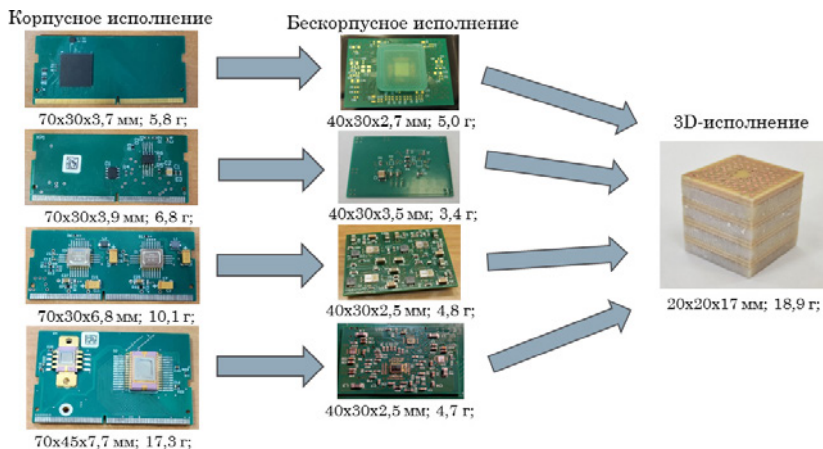


Рис. 2. Габариты и масса различных исполнений микросистемы

Заключение

Применение подхода торцевой коммутации и трехмерной коммутации позволяет значительно снизить массогабаритные параметры изделия. При этом все возникающие при изготовлении микросистемы проблемы могут быть решены для норм вертикальной коммутации в 150 мкм и планарной коммутации вплоть до 50 мкм.

Литература

1. Materials for Advanced Packaging / edited by Daniel Lu, C. P. Wong. Springer, 2017. 974 p.

УДК 538.975

Методы формирования шунтирующих полосок с высоким аспектным соотношением для АМР-датчиков с повышенной чувствительностью

Грабов А. Б., Баранов А. А., Дидык П. И., Котельников А. С., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

mail@cniihm.ru

Исследованы технологические методы повышения аспектного соотношения шунтирующих полосок анизотропных магниторезистивных датчиков. Описывается исследование трех технологических методов формирования шунтирующих полосок: 1) одностадийного ЖХТ; 2) двухстадийного ПХТ+ЖХТ; 3) микрогальванического осаждения.

Ключевые слова: магниторезисторы; анизотропные пленки; шунтирующие полоски; травление; микрогальваника.

Для повышения чувствительности и обеспечения линейаризации передаточной характеристики АМР-датчиков наиболее распространен метод формирования шунтирующих полосок на магниторезисторах, позволяющий создать угол $\theta = 45^\circ$ между направлением протекания тока и вектором напряженности магнитного поля. Эффективность шунтирования характеризуется соотношением проводимостей материалов магниторезисторов и шунтов, их аспектным соотношением и геометрической формой (рис. 1).

Было проведено сравнение трех технологических процессов формирования шунтирующих полосок с высоким аспектным соотношением: 1) одностадийного ЖХТ; 2) двухстадийного ПХТ+ЖХТ; 3) микрогальванического.

Одностадийный процесс позволяет формировать шунты из Al толщиной не более 1000 нм (рис. 2). Наличие подтравы, увеличивающегося с ростом толщины, обуславливает неконтролируемое отклонение шунтов по геометрической форме, что вносит неоднородность в распределение токовых линий. Достижимая при одностадийном процессе величина чувствительности АМР-датчика не превышает 1,65 мВ/ЭВ.

Разделительный слой Ti при ЖХТ Al является стоп-слоем, но при ПХТ в плазме Si Ti неселективно травливается с Al. Поэтому был предложен двухстадийный процесс формирования полосок барьеров из Al. На первой стадии делается ПХТ Al в плазме Si на глубину 0,6–0,8 толщины Al. Увеличение толщины Al фактически ограничивается длительностью процесса ПХТ, требуемой для обработки. На второй стадии оставшийся Al дотравливается с помощью ЖХТ.

Двухстадийный процесс был апробирован при толщине Al 1500 нм. Толщина Al, дотравливаемого ЖХТ, составила ≈ 350 нм, что минимизировало подтравы и обеспечило сохранение геометрии шунтов (рис. 3). Достижимая чувствительность АМР-датчика при двухстадийном процессе формирования шунтов — 2,04 мВ/ЭВ.

Дальнейшее повышение аспектного соотношения достигается заменой материала полосок барьеров на Cu или Au, что обеспечивается заменой субтрактивных



процессов травления аддитивным методом микрогальванического наращивания. В ходе данной работы нами была продемонстрирована возможность формирования шунтирующих полосок из Cu толщиной 2500 нм и более. Полоски формировались микрогальваническим осаждением из электролита на основе глицината меди непосредственно на поверхность пермаллоя без разделительного слоя Ti.

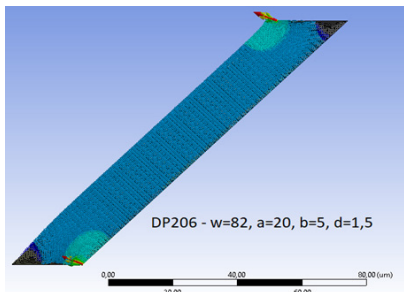


Рис. 1. Расчетное распределение линий тока при оптимальном соотношении проводимостей

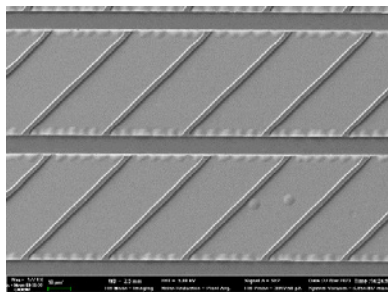


Рис. 2. Полоски барберов из Al 500 нм, сформированные одностадийным процессом ЖХТ

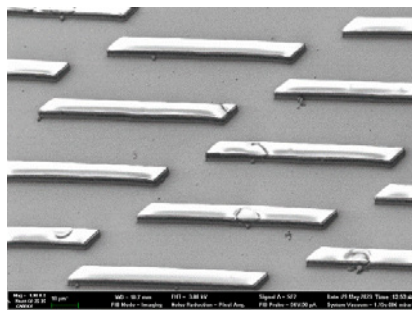


Рис. 3. Полоски барберов 1500 нм, сформированные двустадийным процессом ПХТ+ЖХТ

Литература

1. Tumansky S. Thin Film Magnetoresistive Sensors ©IOP Publishing Ltd, 2001.
2. Kuwahata H., Yamaguchi T. Removal of Aluminum on Glass Substrate by Atmospheric-Pressure Plasma Jet Irradiation // J. Surf. Sci. Nanotech., 2016. Vol. 14. P. 231–236.

УДК 681.586.672

Разработка МЭМС-сенсоров на тепловом принципе для определения параметров газовых сред

Дюжев Н. А.¹, Орешкин Г. И.¹, Денисов В. Е.^{1,2}, Филиппов Н. А.¹,
Парамонов В. В.¹, Чиненков М. Ю.¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

chinenkov@inbox.ru

² *ООО «Фотис»*

105005, г. Калуга, пер. Воскресенский, 29, стр. 2, оф. 305

В работе приведены результаты исследований конструкции и технологии создания МЭМС-сенсоров: потока газов, давления газов, температуры.

Ключевые слова: МЭМС-сенсор; сенсор давления; датчик давления; сенсор температуры; датчик температуры; сенсор потока газов; датчик потока газов; хроматограф.

Применение технологии МЭМС позволяет создавать миниатюрные сенсоры для анализа параметров газа: потока, давления, температуры. Разрабатываемые датчики на основе МЭМС-сенсоров относятся к приборам на мембранно-тепловом принципе действия. В МЭМС-сенсоре давления детектирование перераспределения теплового потока производится термопарами. Полость сенсора заполняется инертным газом с минимальной теплопроводностью (азот, аргон, ксенон и др.). Гибкая мембрана сенсора, чувствительная к изменению внешнего давления, изготавливается из диэлектрических или проводящих материалов в зависимости от необходимой механической прочности и диапазона измерений. Для обеспечения высокой чувствительности датчика к изменению внешнего давления в качестве материала нагревателя и термопар в полости датчика применяется сильнолегированный поликремний. МЭМС-сенсор датчика температуры представляет собой двумерную матрицу термочувствительных элементов. Каждый элемент содержит площадку из поглощающего ИК-излучение слоя нитрида кремния, соединенную с подложкой. Площадка посредством теплопередачи разогревает поликремниевые термопары, что и определяет эффект температурного детектирования датчика. Принцип действия датчика потока газов основан на явлении смещения теплового облака, сформированного несколькими нагретыми металлическими термоэлементами. Спротивление термоэлементов изменяется под действием градиента температуры, что приводит к возникновению разбаланса напряжений на мостовой схеме сенсора.

В ходе проведенных работ изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-сенсоров, на которых были проведены исследования функциональных характеристик. Результаты исследований продемонстрировали возможность создания датчиков на их основе. Также были рассмотрены способы герметизации и корпусирования МЭМС-сенсоров с использованием технологии 3D-интеграции сенсора с кристаллом схемы управления. В работе предложена перспективная конструкция МЭМС-сенсора для хроматографа, в которой тонкопленочные терморезисторы на диэлектрической мембране выполняют роль термочувствительных элементов.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ
(ГК № 075-15-2021-1350 от 05.10.2021, вв. номер 15.SIN.21.0004)
с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ*



УДК 621.398

Отладочный комплект для комплексного тестирования инерциально-спутниковой навигационной системы на базе МЭМС-датчиков

Еркин П. В.¹, Захаров В. П.², Соломкина Н. А.¹, Галкин А. А.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² *ООО «Лаборатория Микроприборов»*

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Приведены основные сведения об инерциальном модуле ГКВ-1 OEM и отладочном комплекте для него. Продемонстрирован метод полунатурного моделирования работы модуля ГКВ-1 OEM в составе различных объектов применения с помощью отладочного комплекта.

Ключевые слова: МЭМС; ГНСС; инерциальная навигация; отладочный комплект.

Инерциально-спутниковые навигационные системы (ИСНС) на основе МЭМС-технологий открывают новые возможности использования в области оценки движения, например в системах стабилизации, мониторинга пространственной ориентации, в устройствах беспилотного управления (беспилотные летательные аппараты, морской и наземный транспорт). Их главные преимущества по сравнению с похожими системами — это малые масса и габариты, а также низкое энергопотребление и высокая прочность.

Обеспечение требуемой точности таких систем достигается благодаря комплексованию данных инерциальных систем со спутниковыми системами навигации [1]. В качестве элементной базы могут рассматриваться в первую очередь микромеханические гироскопы и акселерометры.

В статье представлены технические характеристики и функциональность ИНС на примере SMT инерциального модуля ГКВ-1 OEM производства «Лаборатория Микроприборов». Основой модуля является измерительный блок, состоящий из трехосевого датчика угловой скорости, акселерометра и магнитометра, а также барометра и вычислителя. ГКВ-1 OEM имеет три режима работы, которые задаются программно: блок датчиков (IMU), вычисление ориентации (AHRS) и навигации (INS).

Для настройки, приема и передачи данных по разным интерфейсам, работы с ГНСС-приемниками и проверки работы алгоритмов необходимо использовать отладочный комплект, состоящий из оценочной платы и модулей расширения. Модули расширения представляют собой платы, содержащие различные преобразователи интерфейсов, приемники ГНСС-сигналов, источник вторичного питания с широким диапазоном входных напряжений.

В работе описывается принцип работы комплексированного навигационного решения, дается характеристика видов выставки навигационного алгоритма, показывается методика испытаний точностных характеристик инерциально-спутниковой навигационной системы на базе ГКВ-1 OEM с помощью отладочного комплекта.

В ходе проведения исследования оценивались:

- 1) количественные параметры: углы ориентации, координаты, скорости, погрешности вычисления параметров и др.;
- 2) качественные параметры: отработка систем в составе отладочного комплекта и алгоритма ИСНС.

В статье приведены результаты проведенных исследований и сделаны выводы о точностных характеристиках инерциально-спутниковой навигационной системы на базе ГКВ-1 OEM.

Литература

1. Михеев А., Родин А. Лаборатория микроприборов — разработка инерциальной навигации для беспилотников [Текст] // Беспилот, 2020. — 11 с.

УДК 538.975

Датчик магнитного поля на основе АМР-эффекта

Грабов А. Б., Баранов А. А., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

mail@cniihm.ru

Представлены результаты исследования характеристик двухосевых однокристалльных анизотропных преобразователей магнитного поля на основе тонких пленок $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Достигнутая чувствительность по каждой оси составляет 2,04 мВ/ЭВ, а начальный разбаланс моста $\Delta U = -30$ мВ.

Ключевые слова: анизотропный; магниторезистивный; сенсор; магнитное поле.

Магнитометры широко используются для компенсации дрейфовых сигналов акселерометров и гироскопов при проведении инерциальных измерений в процессе ориентации различных объектов. Наилучшее сочетание чувствительности, габаритных характеристик, энергопотребления демонстрируют чувствительные элементы на анизотропном магниторезистивном эффекте (АМР) в тонких пленках $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ [1, 2]. ФГУП «ЦНИИХМ» была разработана технология изготовления магниторезистивного чувствительного элемента геомагнитного поля в форм-факторе, обеспечивающем взаимозаменяемость с наиболее распространенными образцами зарубежной ЭКБ.

Топология чувствительных элементов разрабатывалась с учетом оптимального соотношения характеристик ферромагнитных пленок $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (поверхностного сопротивления R_s , Ом/□, величины АМР-эффекта $\Delta R/R$, %, коэрцитивной силы H_c , поля анизотропии H_a). Шестизондовым методом экспериментально было установлено, что для достижения $dR/R \geq 3,5\%$ величина R_s должна находиться в промежутке от 1,75 до 2,2 Ом/□ (рис. 1). По этим исходным данным был выполнен расчет распределения размагничивающего фактора N_d в магниторезисторе. Было установлено, что оптимальная чувствительность S^* и минимальный уровень шума будут наблюдаться при ширине АМР-полоски $w = 55$ мкм.

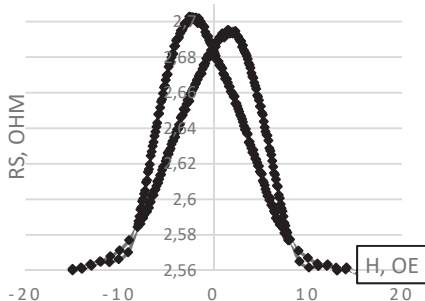


Рис. 1. Вольт-эрстедная характеристика анизотропной пленки $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$

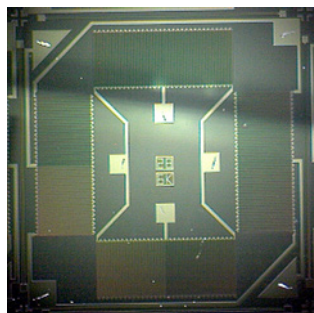


Рис. 2. Микрофотография двухосевого АМР-преобразователя магнитного поля

Технологический процесс формирования АМР-структуры включает в себя магнетронное напыление ферромагнитных пленок в магнитном поле, формирование рисунка магниторезисторов методом фотолитографии, формирование структуры шунтирующих полосок (барберов) и катушки размагничивания (рис. 2). Отличительной особенностью разработанного нами техпроцесса является 100%-й неразрушающий контроль качества ферромагнитных пленок 6-зондовым методом. Разработанный технологический процесс позволяет выпускать кристаллы АМР со средней величиной $S^* = 2,0 \text{ мВ/В} \cdot \text{Гс}$ и выходом годных кристаллов с пластины $>70\%$ (рис. 3).

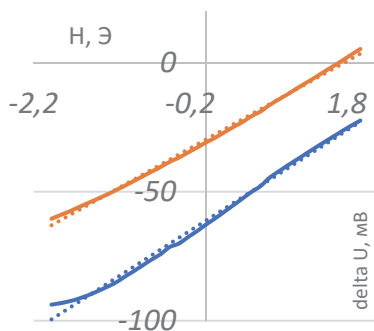


Рис. 3. Передаточная характеристика двухосевого АМР-датчика

Литература

1. Ажаева Л.А., Грабов А.Б., Суханов В.И., Тимофеев Б.В. Разработка АМР-сенсора индукции магнитного поля Земли на основе тонких пленок сплава $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{18}\text{Co}_6$ // Датчики и системы, 2020. — № 1 (243). — С. 34–41.
2. Tumanski S. Thin-Film magnetoresistive sensors. s.l.: IOP Publishing, 2001. P. 441.



УДК 544.6.076.2

Исследование возможности применения угловых молекулярно-электронных датчиков для создания малогабаритной скорректированной курсовертикали для беспилотных летательных аппаратов

Зайцев Д. Л., Жубанышкалиев А., Тарасенко А. Б.

Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы нелинейные искажения в сигнале молекулярно-электронного измерителя угловой скорости, изучены его шумовые характеристики. Рассмотрены основные ошибки, определяющие точность получаемых данных, и методы их устранения: изменение масштабного коэффициента в зависимости от величины сигнала гармонического искажения, собственный шум и дрейф нулевого смещения. Предложен механизм цифрового комплексирования сигналов микромеханического гироскопа и молекулярно-электронного преобразователя в целях изучения возможности создания прибора, по своим шумовым и точностным характеристикам не уступающего молекулярно-электронным измерителям, но при этом обладающего полосой пропускания строго от 0 Гц применительно к задачам навигации беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: гироскоп; молекулярная электроника; курсовертикаль; беспилотный летательный аппарат.

Введение

Основным элементом молекулярно-электронного преобразователя (МЭП) является преобразующая электродная ячейка, помещенная в концентрированный раствор электролита, в котором протекает обратимая окислительно-восстановительная реакция на электродах [1]. Одной из особенностей приборов, основанных на молекулярно-электронной технологии, является сложный вид их амплитудно-частотной характеристики. Полная передаточная функция МЭП определяется произведением передаточных функций механической и электрохимической систем [2]. В области низких частот АЧХ является плоской в единицах углового ускорения и, соответственно, возрастает $\sim f$ в единицах угловой скорости [3]. Далее следуют относительно плоский участок и спад сложной формы. При помощи корректирующей электроники плоский участок характеристики можно существенно расширить. Однако так же, как невозможно отодвинуть верхнюю граничную частоту в бесконечность, невозможно и опустить нижнюю планку регистрируемых частот до нуля герц. МЭП физически не может регистрировать постоянные угловые скорости. Эта особенность является основным фактором, ограничивающим использование молекулярно-электронной технологии в области систем инерциальной навигации [4], и препятствует прямой конкуренции с микромеханическими вибрационными гироскопами.

Комплексирование сигналов микромеханического гироскопа и МЭП

Используемый в проведенном исследовании метод объединения датчиков основывается на следующем факте. Рассмотрим два прибора, обладающих плоскими

амплитудно-частотными и фазово-частотными характеристиками во всем интересующем нас частотном диапазоне. При фильтрации их сигналов высокочастотным и низкочастотным фильтрами первого порядка и затем сложении будут вновь восстановлены плоские АЧХ и ФЧХ сигнала. Это объясняется тем, что сложение передаточных функций этих двух фильтров дает единицу (рис. 1а, б):

$$r_g \frac{1}{1+i\omega\tau} + \frac{i\omega\tau}{1+i\omega\tau} = 1,$$

где τ задает частоту среза и в терминах аналоговых фильтров равна RC. Таким образом, низкочастотная область спектра полученного сигнала должна основываться на показании микромеханического гироскопа, а высокочастотная — молекулярно-электронного преобразователя, обладающего существенно более низкими собственными шумами, но, тем не менее, дешевого и миниатюрного с точки зрения массогабаритных и потребляющих характеристик. В целях комплексирования был выбран молекулярно-электронный преобразователь с увеличенным гидродинамическим сопротивлением для обеспечения необходимого динамического диапазона, оптимального для БПЛА. Предлагаемый алгоритм комплексирования был реализован при помощи программного обеспечения Dadisp. После вычитания постоянного смещения методом быстрого преобразования Фурье рассчитывается спектр сигнала. Затем спектр умножается на комплексную функцию, являющуюся, по сути, передаточной функцией некой виртуальной корректирующей электроники. При помощи обратного преобразования Фурье по скорректированному спектру восстанавливается временная последовательность. Сигнал микромеханического гироскопа обрезается соответствующим низкочастотным фильтром. Затем сигналы датчиков складываются. Такой алгоритм достаточно просто реализуется в цифровом виде, и далее к нему можно «приклеивать» другие корректирующие алгоритмы, например учитывающие нелинейность масштабного коэффициента от амплитуды сигнала, чтобы компенсировать известную чувствительность к линейному ускорению. На рис. 2 представлен наглядный результат комплексирования, проявляющийся в существенном улучшении измеряемых угловых скоростей и ускорений.

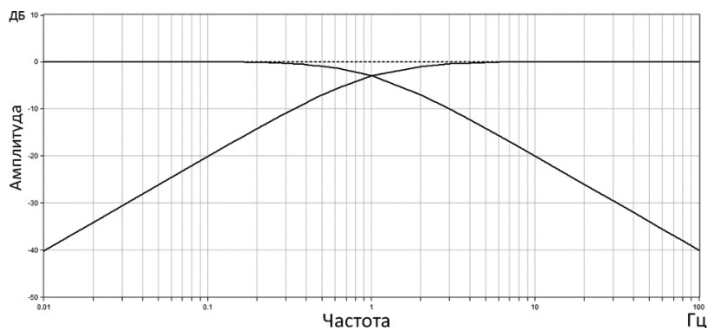


Рис. 1а. АЧХ идеальных фильтров низких и высоких частот с частотами среза 1 Гц

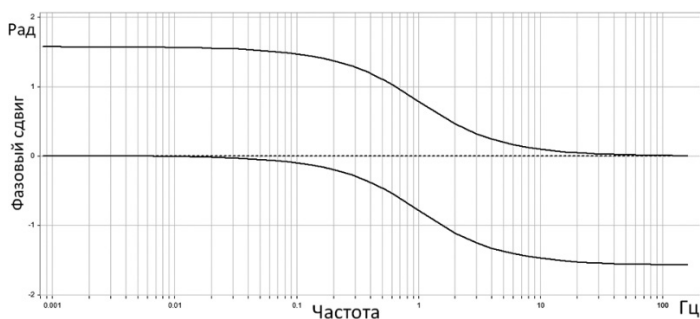


Рис. 16. ФЧХ идеальных фильтров высоких и низких частот с частотами среза 1 Гц

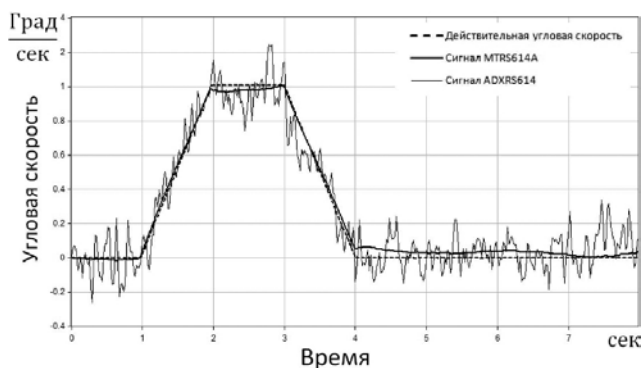


Рис. 2. Сравнение откликов компенсированного МЭП и МЕМС на сигнал, состоящий из участков разгона, постоянной угловой скорости и торможения. Каждый из участков имеет продолжительность 1 сек

Заключение

Анализ приведенных результатов показывает, что молекулярно-электронные измерители угловых скоростей в широкой полосе частот намного опережают лучшие из микромеханических аналогов и успешно конкурируют с другими типами измерителей по таким характеристикам, как уровень собственных шумов, величина произвольного ухода скорости и уровень гармонических искажений. Нелинейность масштабного коэффициента МЭП и чувствительность к линейным ускорениям велики, однако могут быть учтены при коррекции сигнала, а предлагаемая схема комплексирования позволит применить стандартные алгоритмы в целях облета курса и вертикали БПЛА для работы малогабаритной автономной навигационной системы, функционирующей в условиях постановки помех сигналам ГНСС.

Литература

1. Шабалина А. С., Зайцев Д. Л., Егоров Е. В., Егоров И. В., Антонов А. Н., Бугаев А. С., Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Молекулярно-электронные преобразователи в современных измерительных приборах // Успехи современной радиоэлектроники, 2019. — № 9. — С. 33–42.
2. Bugaev A. S., Agafonov V. M., Antonov A. N., Belotelov K. S., Dudkin P. V., Egorov E. V., Egorov I. V., Krishtop T. V., Neeshpapa A. V., Popov V. G., Shabalina A. S., Vergeles S. S., Uskov V. V., Zaytsev D. L., Zhevnenko D. A., Zhabin S. N., Krishtop V. G. Molecular electronic transducers for measuring instruments // Journal of Communications Technology and Electronics (Radiotekhnika i Elektronika), 2018. Vol. 63. № 12. P. 1339–1351.
3. Чикишев Д. А., Егоров И. В., Зайцев Д. Л. Исследование нелинейных эффектов в молекулярно-электронных преобразователях диффузионного типа // Труды 1-й Всероссийской конференции по интеллектуальным датчикам и системам «Интелиум-2018», 4–5 октября 2018, Санкт-Петербург, Россия. — С. 17.
4. Агафонов В. М., Зайцев Д. Л., Шабалина А. С. Шумовые характеристики миниатюрных молекулярно-электронных измерителей угловых параметров движения // Известия вузов. Приборостроение, 2009. — № 7. — С. 55–59.



УДК 681.586.72LiDAR

Разработка роботизированного комплекса для отладки и исследования систем технического зрения, ориентации и навигации средствами автоматизированного проектирования

Галкин А. А.¹, Еркин П. В.¹, Захаров В. П.², Соломкина Н. А.¹,
Тимошенков А. С.², Тимошенков С. П.¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² ООО «Лаборатория Микроприборов»
124527, г. Москва, г. Зеленоград Солнечная аллея, 6

В статье представлен процесс разработки и интеграции роботизированного комплекса, способного выполнять задачи технического зрения, ориентации и навигации. Мы сосредотачиваем внимание на разработке комплекса при помощи средств автоматизированного проектирования Creo Parametric и Altium Designer. Такой интегрированный подход позволяет объединить механические, электронные и программные аспекты проектирования, обеспечивая цельный функциональный результат.

Ключевые слова: МЭМС; ГНСС; инерциальная навигация; LiDAR; картография; автономный транспорт.

Введение

В настоящее время робототехника и автономные системы приобретают все большее значение во множестве сфер человеческой деятельности, включая промышленность, медицину, науку и многие другие. Этот стремительный прогресс в области роботизации открывает перед нами новые горизонты, превращая сложные задачи в возможности для автоматизации и оптимизации процессов. Важным аспектом при разработке таких роботов становятся системы технического зрения, ориентации и навигации, которые играют ключевую роль в обеспечении эффективной и надежной работы автономных и полуавтономных роботизированных систем.

Цель данной статьи заключается в представлении процесса и результатов разработки роботизированного комплекса, способного выполнять сложные задачи технического зрения, ориентации и навигации. В основе этой работы лежит совмещение областей механики, электроники и программирования с акцентом на интеграцию разнообразных компонентов в единый функциональный комплекс.

Цель и задачи, выполняемые в работе

Целью данной работы является создание роботизированного комплекса, способного выполнять задачи технического зрения, ориентации и навигации, а также исследование его функциональности и эффективности с использованием средств Creo Parametric и Altium Designer.

Задачи работы:

- проанализировать актуальные тенденции в области робототехники и автономных систем, выявив роль и значимость систем технического зрения, ориентации и навигации;
- изучить методы интеграции программных средств Creo Parametric и Altium Designer для разработки компонентов роботизированного комплекса,

обеспечивающих взаимодействие механических и электронных элементов;

- разработать архитектуру роботизированного комплекса, определить необходимые компоненты, сенсоры и систему управления;
- разработать и интегрировать систему ориентации и навигации, используя инерциальные датчики и ГНСС для определения положения и ориентации робота [1];
- провести эксперименты с разработанным роботизированным комплексом в различных сценариях, оценить его производительность и эффективность;
- сравнить результаты работы разработанного комплекса с альтернативными решениями и провести анализ полученных данных;
- обобщить результаты исследования, подчеркнуть значимость разработанного комплекса в контексте современной робототехники и представить перспективы его применения в различных областях [2];
- описать процесс разработки конструкции роботизированного комплекса и выбора материалов, обеспечивающих надежность и производительность системы;
- сформулировать выводы на основе полученных результатов и предложить направления для дальнейших исследований и улучшений разработанного комплекса.

Архитектура и функциональность комплекса

Основой разработанного роботизированного комплекса является его архитектура и характеристики. Комплекс включает в себя сенсоры для технического зрения, такие как лидары, систему ориентации и навигации, механические крепления на крышу автомобиля для передвижения и систему управления, обеспечивающую взаимодействие между компонентами. Ключевой особенностью комплекса является его способность выполнять задачи технического зрения, ориентации и навигации, что обеспечивает его автономное функционирование.



Рис. 1. Схема разработанной системы [3]

Интеграция средств проектирования

Процесс разработки роботизированного комплекса начинался с проектирования его компонентов. Интеграция средств проектирования, таких как Creo Parametric и Altium Designer, обеспечила эффективное взаимодействие между механическими



и электронными частями комплекса. Creo Parametric используется для создания и анализа 3D-моделей механических элементов, а Altium Designer — для разработки печатных плат и ячеек.

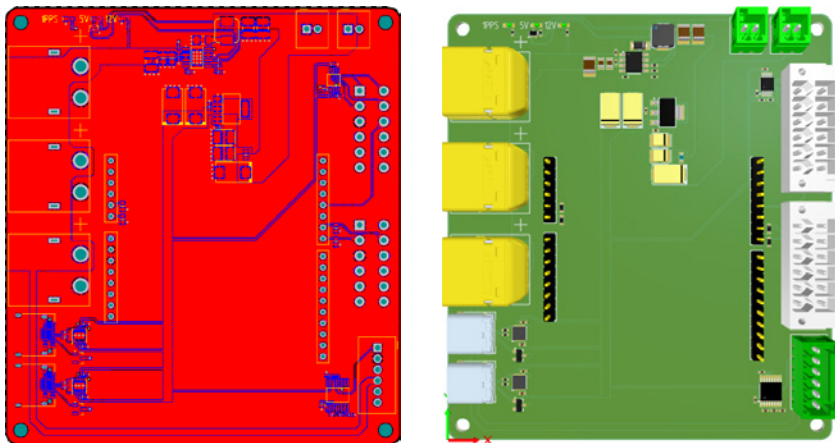


Рис. 2. Вид ячейки роботизированного комплекса в разных САПР

Интеграция средств проектирования играет существенную роль в обеспечении эффективности и согласованности процесса разработки роботизированного комплекса. Этот этап представляет собой тесное взаимодействие между механической и электронной частями системы, позволив создать цельное и хорошо сбалансированное решение.

Литература

1. Тимошенков С. П., Кульчицкий А. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов [Текст] // Известия высших учебных заведений. Электроника. — Москва: МИЭТ, 2012. — № 6 (98). — С. 51–56. — EDN PJHDEV.
2. Инерциальные модули в лидарных системах [Электронный ресурс]. — URL: <https://mp-lab.ru/lidar-system> (дата обращения: 15.08.2022).
3. Лидар. Все что нужно знать [Электронный ресурс]. — URL: <https://gistroy.ru/article/lidar> (дата обращения: 15.08.2022).

УДК 629.05

Технология формирования трехслойной кремниевой МЭМС-структуры

Фролов Е. Н., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.*ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»**115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а*

Рассмотрены особенности создания МЭМС-структур с формированием электрических вакуумно-плотных контактов к чувствительным элементам МЭМС, корпусированных на уровне пластины.

Ключевые слова: МЭМС; прямое сращивание.

В представленной работе обрабатываемая подложка представляет собой конструкцию, состоящую из трех кремниевых пластин: нижней пластины кремния толщиной 380 мкм, центральной пластины кремния толщиной 60–100 мкм, верхней пластины кремния (крышки) толщиной 100–200 мкм. Пластины прочно соединены между собой методом прямого сращивания через диоксид кремния так, чтобы сформировать систему вакуумно-плотных полостей. В центральной пластине кремния помощью системы канавок заранее изготовлен требуемый подвижный элемент МЭМС. В крышке травлением образованы отверстия, через которые осуществляется электрический контакт с чувствительными элементами МЭМС. Герметизация МЭМС-структур осуществляется при прямом сращивании крышки с центральной пластиной через диоксид кремния по дорожкам вокруг отверстий в крышке.

Литература

1. Achtsnick M., Drabbe J., Hoogstrate A. M., Karpuschewski B. Erosion behaviour and pattern transfer accuracy of protecting masks for micro-abrasive blasting // J. Mater. Proc. Tech., 2004. 149 (1–3).
2. Wensink H., Berenschot J. W., Jansen H. V., Elwenspoek M. C. Mask Materials in Powderblasting // 10th Workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems (MME 99), September 27–28, 1999, Gif-sur-Yvette, France. P. 199–202.



УДК 53.087.92

Повышение устойчивости чувствительного элемента микромеханического акселерометра маятникового типа к ударным нагрузкам

Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

suzdaltsevsky@rambler.ru

С помощью прочностного анализа в комплексе конечно-элементного моделирования Ansys 19R1 рассматривается напряженно-деформированное состояние ограничительных стопперов из диоксида кремния для маятника акселерометра ММА-2 с различным форм-фактором основания. Импульсная ударная нагрузка — 400 г, длительность полусинусоидального импульса — 2–5 мс.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр; МЭМС; корпусирование на уровне пластин; бесплатформенная навигационная система.

В настоящее время активно ведутся разработки бесплатформенных навигационных систем (БИНС) для систем ориентации и навигации малоразмерных летательных аппаратов, а также управляемых боеприпасов. При создании БИНС тактического класса точности необходимо использовать чувствительные элементы (ЧЭ), способные сочетать высокую чувствительность и стойкость к ударным нагрузкам. Технология микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволяет реализовывать ЧЭ, удовлетворяющие данным требованиям. Микромеханические акселерометры прямого преобразования на основе дифференциальных конденсаторов с кремниевым маятником обладают высокими техническими характеристиками (высокие чувствительность, разрешающая способность, низкий уровень шума). При этом, благодаря отсутствию в конструкции материалов с различающимися термическими коэффициентами линейного расширения, обеспечивается очень низкий температурный и временной дрейф. Для использования микромеханических акселерометров в экстремальных условиях необходимо поднимать прочность их ЧЭ к ударным нагрузкам. В настоящей работе методом конечных элементов выполняли моделирование и подбор оптимального форм-фактора и геометрических размеров ограничителей перемещения маятника акселерометра. Для этого рассматривали напряженно-деформированное состояние ограничителей различных форм-факторов под воздействием ударной нагрузки.

Высокая площадь контакта ограничителей с маятником приводит к появлению паразитных эффектов «залипания» [1]. То есть в конструкции ЧЭ микромеханического акселерометра необходимо предусмотреть ограничители перемещения с минимальной площадью контакта при одновременном обеспечении заданной прочности к ударным воздействиям. При построении модели рассматривали ограничители на основе диоксида кремния с размером верхней площадки 3×3 мкм. Форму основания ограничителей (см. рис. 1) перемещений выбирали исходя из возможности их реализации в технологическом маршруте изготовления ЧЭ микромеханических акселерометров (см. рис. 2) и с учетом преимуществ применения жидкостных химических процессов вместе с химической полировкой поверхности,

поскольку отсутствие концентраторов напряжения способствует повышению прочности материала [2].

Расчеты проводили для микромеханических акселерометров с диапазоном преобразования $\pm 20 \text{ м/с}^2$. Характеристики ударного воздействия: пиковое ударное ускорение — 400 g; длительность действия ударного ускорения — 2–5 мс. Ударный импульс задавали в форме полусинусоидального воздействия. Предполагали, что удар равномерно распределен между двумя ограничителями, ближайшими к свободному концу инерционной массы.

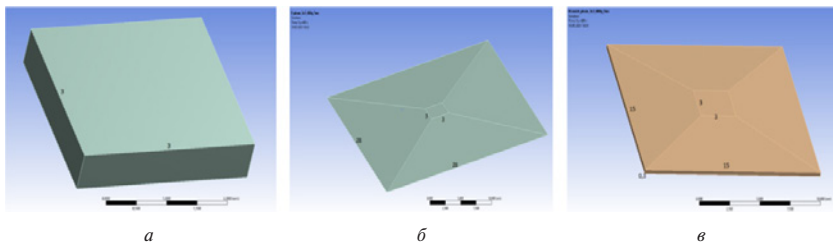


Рис. 1. Типы ограничителей перемещений: а) параллелепипед; б) усеченная четырехугольная пирамида; в) параллелепипед с фасками на верхней грани

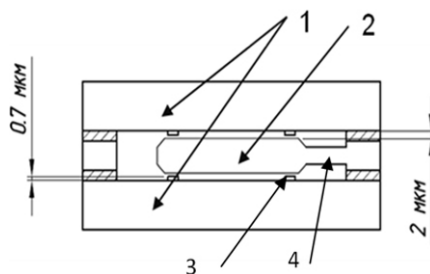


Рис. 2. Схематическое изображение ЧЭ микромеханического акселерометра:
1 — верхний и нижний электроды; 2 — маятник (инерционная масса);
3 — ограничители перемещения инерционной массы; 4 — подвес маятника

Результаты расчета ударной прочности в зависимости от геометрической формы ограничителей перемещения представлены в табл. 1. Показано, что ограничитель в форме простого параллелепипеда (тип а) не обладает достаточной прочностью, будет частично разрушен в результате ударного воздействия и не может быть использован в конструкции ЧЭ. Ограничитель в форме усеченной пирамиды (тип б) будет иметь зону с локальным разрушением, но оставшаяся часть конструкции обладает достаточной прочностью к воздействию ударных нагрузок. При этом потерявшие целостность фрагменты материала ограничителя, вполне вероятно, будут механически удерживаться в области контакта с маятником и не повлияют на работоспособность ЧЭ и микромеханического акселерометра в целом. Ограничитель в форме параллелепипеда с фасками на верхней грани (тип в) также имеет



зону в области контакта с инерционной массой, в которой наблюдаются повышенные механические напряжения. Однако физического разрушения ограничитель такой формы иметь не будет.

Таблица 1. Результаты расчета ударной прочности ограничителей перемещения для ЧЭ микромеханических акселерометров с динамическим диапазоном ± 20 м/с²

Характеристика	Вариант исполнения		
	Тип <i>a</i>	Тип <i>b</i>	Тип <i>v</i>
Минимальный запас прочности	0,85	0,38	1,54
Средний запас прочности	4,24	13,70	12,8
Урон, %	13,00	1,50	0

Для дальнейшей экспериментальной апробации выбран тип *v* — параллелепипед с фасками на верхней грани (тип 3), в связи с сочетанием достаточной прочности при воздействии ударных нагрузок, высокой воспроизводимости геометрических характеристик в процессе изготовления и минимальной площади контакта с поверхностью инерционной массы при функционировании.

Литература

1. Обижаев Д. Ю., Жукова С. А., Суздальцев С. Ю., Сальникова Т. В., Иванов С. Ю. Особенности технологии изготовления чувствительных элементов маятникового акселерометра для инерциальных модулей перспективных систем технического контроля // Наноиндустрия: материалы конференции, 2021. — S7 (107). — С. 481–483.
2. Степанов В. А., Песчанская Н. Н., Шпейзман В. В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. — Л.: Наука, 1984. — 245 с.

УДК 621.3

Актуаторы для микроэлектромеханических систем**Уваров И. В., к. ф.-м. н.***Ярославский филиал Физико-технологического института**имени К. А. Валиева РАН**150007, г. Ярославль, ул. Университетская, 21**i.v.uvarov@bk.ru*

Представлены микроактуаторы для устройств коммутации и микрофлюидных систем. Разработаны методы улучшения рабочих характеристик, технология изготовления и методика испытания актуаторов. Исследованы особенности работы новых микроприводов и физические явления, лежащие в основе их функционирования.

Ключевые слова: МЭМС; переключатель; электростатический актуатор; микрофлюидные системы; насос; электрохимический актуатор.

МЭМС сочетают в себе достоинства микроэлектронных изделий и функциональные возможности крупных систем. Они применяются в автомобильной промышленности, пользовательской электронике и военной технике. Наибольшее распространение получили сенсоры физических величин, такие как гироскопы, акселерометры и датчики давления [1]. Другую категорию МЭМС составляют актуаторы, или приводы, преобразующие электрический сигнал в энергию движения механических структур. Перспективным устройством на основе актуатора является переключатель, замыкающий электрическую цепь, а также насос, создающий движение жидкости в каналах микрофлюидного чипа. Однако эти изделия до сих пор не нашли широкого применения вследствие недостаточно высоких рабочих характеристик. Настоящая работа посвящена микроактуаторам с улучшенными свойствами, предназначенным для использования в устройствах коммутации и микрофлюидике. Представлены методы улучшения рабочих характеристик, описана технология изготовления и методы тестирования актуаторов. Исследованы физические явления, лежащие в основе работы новых микроприводов.

Электростатический актуатор является наиболее подходящим для устройств коммутации. Он имеет простую конструкцию, низкое энергопотребление, высокое быстродействие и совместим с технологией микроэлектроники. В то же время для электростатического привода характерно высокое управляющее напряжение и малое развиваемое усилие, что усложняет использование и снижает надежность переключателя. Кроме того, в нем относительно сложно реализуется активное размыкание, поскольку смена полярности управляющего сигнала не меняет направление силы. В целях снижения напряжения разработан актуатор на основе кантилевера наноразмерной толщины. Отношение длины к толщине достигает 400 и уменьшает напряжение срабатывания до 12,5 В, что в несколько раз ниже рабочего напряжения типовых изделий. Еще более низкое значение 4,9 В достигается в актуаторе с торсионными подвесами, изображенном на рис. 1. Наличие управляющих электродов под каждым плечом балки обеспечивает активное размыкание без усложнения технологии изготовления [2]. Оптимизация формы электродов позволяет актуатору развивать усилие более 100 мкН, необходимое для надежной работы МЭМС-переключателя.

Перспективным актюатором для задач микрофлюидики является электрохимический привод. Он развивает большую силу, необходимую для перемещения жидкости по каналам. Его конструкция проста и надежна, а управляющее напряжение составляет единицы вольт. Однако электрохимический актюатор имеет низкую рабочую частоту, составляющую 0,01 Гц и обусловленную медленной рекомбинацией произведенного газа. В работе представлен электрохимический привод нового типа, на 3–5 порядков опережающий стандартные изделия по рабочей частоте [3]. Устройство изображено на рис. 2. В основе его работы лежит электролиз воды, выполняемый микросекундными импульсами напряжения переменной полярности. Производство водорода и кислорода в пространственно неразделенных нанопузырях обеспечивает быстрое удаление газа в рабочей камере.

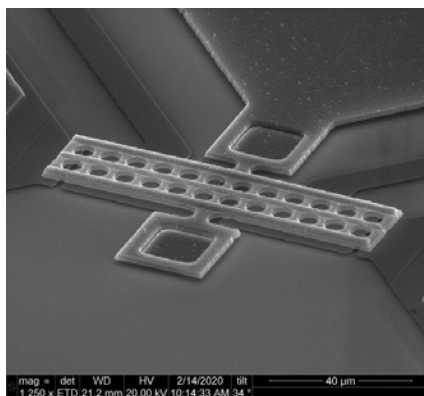


Рис. 1. Электростатический актюатор

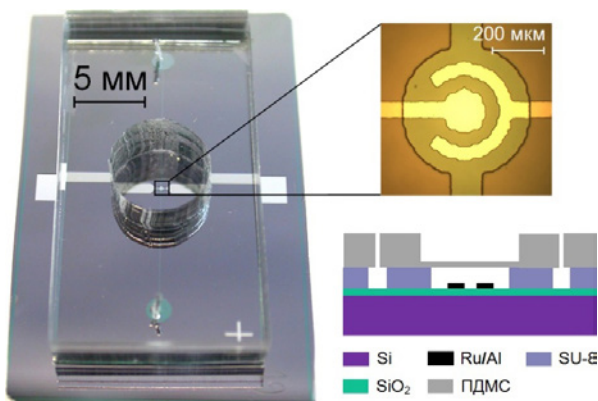


Рис. 2. Электрохимический актюатор

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН
Минобрнауки РФ по теме № FNN-2022-0017*

Литература

1. Bogue R. Recent developments in MEMS sensors: a review of applications, markets and technologies // *Sensor Review*, 2013. Vol. 33. P. 300–304.
2. Uvarov I. V., Kupriyanov A. N. Stiction-protected MEMS switch with low actuation voltage // *Microsystem Technologies*, 2019. Vol. 25. P. 3243–3251.
3. Uvarov I. V., Svetovoy V. B. Nanoreactors in action for a durable microactuator using spontaneous combustion of gases in nanobubbles // *Scientific Reports*, 2022. Vol. 12. 20895.

УДК 004.94

Моделирование сложной гетероструктуры InGaAs/InAlAs ОЛФД

Филиев А. А., Лосев А. В., Заводиленко В. В., Павлов И. Д.

ООО «КуРЭйт»

143026, г. Одинцово, деревня Сколково, ул. Новая, 100

Сформирована модель InGaAs/InAlAs однофотонных лавинных диодов в расчетной среде T-CAD в целях прогнозирования их электрических параметров при эксплуатации в составе детекторов одиночных фотонов. Полученные результаты применимы для оптимизации конструкции однофотонных лавинных фотодиодов при их проектировании в целях использования в качестве чувствительных элементов в приборах для детектирования света. Основным преимуществом разработанной модели InGaAs/InAlAs однофотонных диодов является возможность ее интеграции с электрической схемой управления детектора одиночных фотонов для имитации работы диода в его составе, что позволяет не только производить настройку системы управления детектором, но и тестировать новые схемотехнические решения.

Детекторы одиночных фотонов (ДОФ) на основе однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД) широко используются в области квантового распределения ключей (КРК). В научном сообществе продолжается развитие ОЛФД на основе таких материалов, как Si/Ge, InGaAs/InP и InGaAs/InAlAs. В настоящей работе будет проведено исследование такой перспективной структуры, как InGaAs/InAlAs. Преимущество материала InAlAs в качестве зоны умножения заключается в большой подвижности электронов, что позволяет значительно быстрее гасить возбужденную лавину и переводить структуру в равновесное состояние. Таким образом, данное устройство может обладать большей предельной частотой работы и лучшими характеристиками по послепулсам в сравнении с устройством с зоной умножения, выполненной из материала InP. Это обусловлено тем, что подвижность дырок в InP ниже, чем подвижность электронов в InAlAs.

Моделирование ОЛФД в составе ДОФ производилось путем применения комбинированной модели в T-CAD: электрические параметры диода используются для проведения схемотехнического расчета. Интеграция физической одномерной модели диода производится путем его представления в качестве нелинейного элемента в составе электрической схемы, дифференциальное сопротивление такого элемента рассчитывается в результате реализации его физической модели. Процесс моделирования включает в себя многократное решение дифференциального уравнения.

Сформированная модель InGaAs/InAlAs однофотонных лавинных фотодиодов имплементирована в электрическую схему ДОФ. Модель учитывает основные конструктивные характеристики однофотонных лавинных фотодиодов и влияние внешнего воздействия на их электрические параметры. Такая модель позволит сократить ресурсоемкость и расчетное время применяемых на практике двумерных моделей для решения задачи оптимизации конструкции полупроводниковых структур в их составе для внедрения в ДОФ. С применением данной модели выявлены зависимости влияния конструктивных параметров основных функциональных областей — областей умножения и поглощения — на электрические параметры

однофотонного лавинного диода. Результаты моделирования в среде T-CAD показали, что увеличение ширины зоны умножения приводит к увеличению тока на начальном участке обратной ветви ВАХ и увеличению напряжения пробоя, тогда как увеличение ширины зоны поглощения, напротив, не влияет на начальный участок ВАХ, но также увеличивает напряжение пробоя. Модернизация модели путем введения электрической схемы управления ДОФ открывает возможность производить настройку системы управления ДОФ, а также предварительно тестировать ДОФ до непосредственной сборки устройства.



УДК 53.087.9, ГРНТИ: 59.14.21, 47.49.31, 47.41.99

Разработка и исследование работы многофункционального модуля отслеживания грузов

Чельшев Л. С.^{1,2}, Болычев Ф. С.², Кербоян М. С.¹, Орлов В. М.³

¹ АО «Завод ПРОТОН»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8
leonid.chelyshev@live.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

³ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Рассматривается процесс разработки и тестирования многофункционального модуля отслеживания грузов (ММОГ), описывается уникальная возможность работы устройства при -65°C , исследуется работа встроенного акселерометра и антенны в рамках устройства.

Ключевые слова: трекинг; GPS; ГЛОНАСС; МЭМС; инерциальные датчики; защищенный датчик.

Введение

На данный момент существует достаточно большое количество спутниковых трекеров, способных устанавливать и отправлять данные о местоположении устройства на указанный номер. Однако устройств, работающих в условиях повышенных механических, температурных, а также многих других суровых внешних воздействий, катастрофически мало. В связи с этим была поставлена задача создать и исследовать работу данного устройства, а также его составных частей для лучшего понимания режимов работы в таких условиях. Актуальные проблемы отрасли, характеризующие острую необходимость создания большего количества подобных устройств, описаны в источниках [1, 2]. В рамках работы также был получен патент на полезную модель [3].

Разработка устройства

Модуль реализован в виде печатной платы 4-го класса точности согласно ГОСТ 23.751-86 с покрытием HASL с элементами. На печатную плату поверхностным монтажом через сквозные отверстия добавлены элементы.

В рамках прибора есть два модуля: 1 — основная плата, которая реализует все вышеописанные функции, 2 — модуль SIM800L, GSM приемо-передатчик, припаяемый выводным монтажом к модулю № 1.

Далее в процессе работы были рассчитаны конструкционные параметры для устройства, подобран и доработан корпус для модуля. Итоговая версия смоделированного модуля представлена на рис. 1.

Была построена и рассчитана модель включения разогрева в рамках критически низких температур.



Рис. 1. Итоговый вид многофункционального модуля отслеживания грузов

Исследование устройства

В рамках работы были проведены такие исследования:

- 1) термические испытания;
- 2) испытания измерительной мощности керамической антенны;
- 3) механические испытания.

Термические испытания проходили как с отдельным модулем, так и в составе изделия. В рамках модуля был исследован механизм разогрева печатной платы, зафиксированы практические результаты; вид нагреваемой печатной платы приведен на рис. 2.

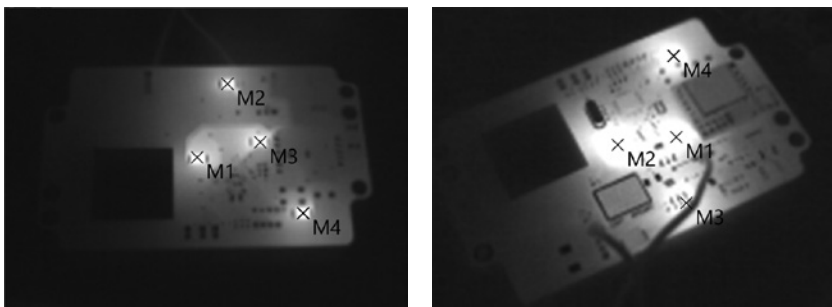


Рис. 2. Тестирование работы цепи подогрева в рамках модуля

В камере тепла и холода, согласно методике испытаний прибор был охлажден до -65°C ; соответствующие график охлаждения представлен на рис. 3. Как мы можем заметить, температура не стала ниже предельной рабочей.

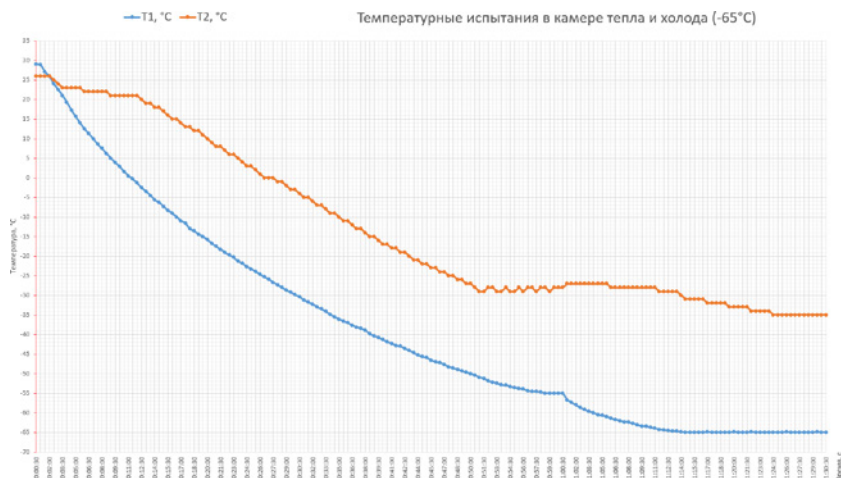


Рис. 3. Общие термические испытания прибора

Испытания приемо-передающей антенны заключались в изменении находящегося в корпусе «радиоокна», различных креплениях, различных вариантах приемной печатной платы.

Механические испытания заключались в прохождении модулем виброиспытаний. Были выбраны частоты от 10 до 1500 Гц, в рамках которых прибору передавалось внешнее воздействие. Прибор выдержал данные испытания.

Литература

1. Совместный отчет TT Club, ИМАСТ и ТАРА о криминальных тенденциях в грузоперевозках в России [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://www.ttclub.com/media/files/tt-club/cargo-theft-in-russia/cargo-theft-trends-in-russia-2020-russian.pdf> (дата обращения: 20.11.2022).
2. Хищение грузов при перевозке: какой этап поставки товаров является самым слабым звеном и как минимизировать риски? [Электронный ресурс] // Грузовая планета: [сайт], 2021. — URL: <https://www.garant.ru/ia/opinion/author/kozhevnikov/1454585/> (дата обращения: 20.11.2022).
3. Патент № 218350 Российская Федерация МПК G01S 19/00 (2010.01), H01C 1/08 (2006.01), G01S 19/01 (2010.01). Многофункциональный сенсорный модуль спутниковой радионавигации: 2022130108 заявл. 21.11.2022; опубл. 23.05.2023 Бюл. № 15 / Чельшев Л. С.; патентообладатель — общество с ограниченной ответственностью «САД ИЗОБРЕТЕНИЙ» [Электронный ресурс]. — URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=218350&TypeFile=html.

УДК 681.78:681.7.062

Разработка конструкции и технологии изготовления торсионного МЭМС-микрозеркала с электростатическим управлением

Дюжев Н. А.¹, Орешкин Г. И.¹, Филиппов Н. А.¹, Чиненков М. Ю.¹, Ким П. П.¹, Белова С. Д.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ», ЦКП «МСТ и ЭКБ»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
chinenkov@inbox.ru*

² *ООО «МИКРОФОТОНИКА»*

248000, г. Калуга, ул. Первомайская, 37, офис 1

В работе приведены результаты отработки технологических операций по созданию свободновисящей плоскости микрозеркала на торсионных подвесах и проведены исследования матрицы микрозеркал под действием электростатического поля.

Ключевые слова: микрозеркало; матрица микрозеркал; торсионное микрозеркало; МЭМС-микрозеркало; модулятор светового потока.

На сегодняшний день имеется ряд технологий, на базе которых можно реализовать коммутаторы световых сигналов. При этом эффективным является использование матриц МЭМС-микрозеркал, аналогичных DLP-матрицам (оптическим модулям), выпускаемым Texas Instruments (США). Принцип действия оптического модуля основан на повороте микрозеркал под действием электростатической силы из одного устойчивого состояния в другое. Оптический модуль на основе данной матрицы микрозеркал с алюминиевым покрытием отражающей поверхности зеркал функционирует в диапазонах длин волн 0,4–0,7 и 3–5 мкм при частоте до 30 кГц. Отечественные аналоги таких устройств на рынке отсутствуют, поскольку создание МЭМС-микрозеркал сопровождается рядом технологических проблем. Сложность создания свободновисящей на торсионах плоскости микрозеркала, планаризация плоскости микрозеркала, отвод тепла от движущихся элементов микрозеркала, интеграция на одном кристалле матрицы микрозеркал и микросхемы управления, негативный эффект «залипания», возникающий в случае соприкосновения подвижной части с поверхностью управляющих электродов, и высокие управляющие напряжения представляют серьезную проблему на пути реализации надежно работающего оптического устройства. В рамках данной работы поставлена задача отработки технологии создания торсионного МЭМС-микрозеркала для быстрого переключения плоского светового потока высокой мощности (пространственного модулятора света) с решением обозначенных проблем.

Расчет показал, что конструкция микрозеркала с торсионным подвесом обеспечивает хороший динамический отклик и малую вероятность электростатического контакта микрозеркала с электродами. На данный момент отработаны технологические операции по созданию свободновисящей плоскости микрозеркала на торсионных подвесах. Проведены исследования динамических свойств микрозеркала под действием электростатического поля.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (контракт № 075-15-2021-1350 от 05.10.2021, внутренний номер 15.SIN.21.0004) и проведена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ

УДК 621.38

Рiп-структура как детектор нейтронных потоков

Яшин В. С., Федоренко В. В.

ООО «СофтЭксперт»

141595, Московская область, д. Ложки,

тер. Индустриальный парк Есиново, стр. 17а/2, пом. 19

expert@softexp-rf.ru

В докладе рассматривается изменение электрических характеристик рiп-диода под действием нейтронного излучения со спектром нейтронов, соответствующим спектру деления. Исследован процесс (восстановления) фединга характеристик со временем в период 365 дней.

На основе данной структуры исследованы возможности использования рiп-диода в качестве накопительного детектора для контроля общей дозы нейтронов на персонал и аппаратуру.

Исследованы температурные кривые ВАХ, выбран оптимальный измерительный ток для точного контроля накопленной дозы.

Предлагаются технические решения для измерительной схемы и ее аппаратная реализация.

Разработаны сборки детекторов на основе гибридной технологии.

Начаты исследования по влиянию протонного излучения и ТЗЧ на свойства структуры.

Ключевые слова: рiп-диод; нейтронное излучение; флюенс; доза; дозовая нагрузка.

Введение

Изменения свойств рiп-структуры под действием нейтронного излучения было замечено рядом исследователей. В связи с этим предпринимались попытки применения рiп-структуры в качестве нейтронного детектора.

В ходе исследования были получены достаточно противоречивые результаты. При более тщательном исследовании результатов было отмечено, что определяющим фактором является толщина структуры. «Тонкие» и «толстые» структуры имеют различный отклик на действие нейтронного излучения.

Для проверки возможности использования рiп-структуры в качестве нейтронного детектора был изготовлен детектор, имеющий практически кубическую структуру с размером 1×1×1,2 мм. При этом отклик данной структуры оказался хорошо воспроизводимым и имел линейную зависимость прямого напряжения открытия перехода от полученной дозы нейтронного излучения.

Описание структуры рiп-диода

Известен Р-І-N-диодный преобразователь нейтронного излучения (RU 2408955 С1, опубл. 10.01.2011), содержащий высокоомную подложку кремния N-типа проводимости и несколько инжектирующих электродов р-типа проводимости, при этом эмиттеры р-типа проводимости Р-І-N-диодного преобразователя нейтронного излучения расположены в виде матрицы на лицевой стороне подложки, а значение длины базы варьируется глубиной травления кремния на обратной стороне подложки, в области между эмиттером и контактом к области N-типа проводимости.

Дозовые характеристики рpн-диода

Для примера представим характеристики зависимости изменения напряжения на рpн-структуре от поглощенной дозы нейтронного излучения спектра деления. Испытания проведены на экспериментальной базе 12 ЦНИИ МО РФ. В данном эксперименте микросборка находилась в дополнительном пластмассовом корпусе с толщиной стенки 1 мм.

Экспериментальные данные. Их анализ. Новые ВАХ после облучения

Испытания проводились комиссией, назначенной приказами начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России № 698 от 04.12.2020 г., № 420 от 07.07.2021 г., в периоды с 07.12.2020 г. по 31.04.2021 г., с 08.07.2021 г. по 31.08.2021 г. на моделирующих установках (МУ) «ПРИЗ-М», «Транс-4-1» на территории научно-испытательного центра ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Нагрузки дозиметров необходимой дозой излучений проводились в соответствии с «Методикой определения параметров нагружения образцов ВВТ на установках «ПРИЗ-М», «СНЕГ-13», РХ-у-30, 2010 г.» (инв. № 3/441) и «Методикой испытаний дозиметров Д-16-01, Д-16-01М детекторов МНК-5 в их составе на чувствительность к импульсному гамма-излучению с использованием моделирующей установки “Транс-4-1”», утвержденными начальником ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Литература

1. Holmes-Siedle A. G. The space charge dosimeter — general principles of a new method of radiation dosimetry // Nucl. Instrum. and Methods, 1974. Vol. 121. P. 169–179.
2. Rosenfeld A. B. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities // Radiation Protection Dosimetry, 2002. Vol. 101. P. 393–398.
3. Asensio L. J., Carvajal M. A., Lopez-Villanueva J. A. et al. Evaluation of low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // Sensors and Actuators, 2006. Vol. A125. P. 288–295.
4. Kwan I. S., Rosenfeld A. B., Qi Z. Y. et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors // Radiation Measurements, 2008. Vol. 43. P. 929–932.
5. Перевертайло В. Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Тр. 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса, 2004. — С. 200.



УДК 531.742: 62.791

Матричная технология измерений. Точность измерения координат элементов и контроль фотошаблонов

Королев А. Н.¹, Лукин А. Я.², Филатов Ю. В.¹

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

yufilatov@mail.ru

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Сформулированы основы матричной технологии линейно-угловых измерений. Если элементы оптико-цифровой системы имеют физическое разрешение порядка нескольких микрометров, то, используя марку с множеством элементов и измеряя координаты изображений этих элементов, можно определить средневзвешенные линейные и угловые координаты марки со сверхвысокой точностью.

Ключевые слова: линейно-угловые измерения; многоэлементная марка; матричный фотоприемник.

Авторами предложена матричная технология измерения линейных и угловых координат [1]. В новой технологии используется оптико-цифровая измерительная схема с оптической маркой, имеющей очень большое количество элементов (десятки и сотни тысяч). Одновременная регистрация изображения всех элементов марки с помощью цифровой камеры с последующим вычислением их координат повышает точность измерения положения марки в сотни и более раз. Выполнение такого количества измерений ранее было невозможно из-за ограниченного числа измерительных каналов и необходимости обеспечить стационарные условия в течение всего времени длительных измерений. Для новых измерителей прогнозируемая погрешность находится на уровне долей нанометра в линейной шкале и тысячных долей угловой секунды в угловой шкале.

В докладе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие указанные метрологические характеристики матричных измерителей. Обсуждается возможность использования матричной технологии для комплексного решения задачи контроля фотошаблонов путем измерения отклонения координат элементов фотошаблона от расчетных значений, соответствующих координатам идеальной решетки (математической матрицы).

Литература

1. Королев А. Н., Лукин А. Я., Филатов Ю. В., Венедиктов В. Ю. Матричная технология линейно-угловых измерений // Оптический журнал, 2022. — Т. 89. — № 12. — С. 54–64.

УДК 538-15, 621.382

Инфракрасные сенсоры на кремниевых МЭМС

Фетисов Е. А.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
efetisov@ro.ru*

Проведен обзор разработок и исследований в области тепловых ИК-сенсоров на кремниевых термопарных МЭМС, которые выполнялись в 2008–2022 гг. в основном в МИЭТ. Рассмотрены принципы работы и физические механизмы преобразования оптических сигналов в тепловые и в электрический видеосигнал. Сделаны оценки предельных возможностей. Утверждена одноименная программа повышения квалификации в объеме 72 часов.

Ключевые слова: ИК-излучение; тепловые ИК-сенсоры; микроэлектромеханическая система (МЭМС); сенсоры ИК-изображения; термопары; обобщенная удельная обнаружительная способность; кремний.

Направления научной программы конференции: микросистемы, сенсоры и актюаторы; технологии оптоэлектроники и фотоники.

Автор считает, что в данной работе, новой в период 2008–2022 гг., является совокупность следующих положений и полученных результатов:

- кремниевые термопарные ИК-сенсоры изображения — альтернатива широко известным микроболометрическим матрицам;
- пороговая чувствительность термопар, превосходит чувствительность терморезисторов за счет отсутствия в первых явления саморазогрева и сопутствующего ему шума;
- предельная температура источников ИК-излучения для термопарных сенсоров существенно выше, чем для болометрических, благодаря большему диапазону линейности;
- характеристиками термопарных ИК-сенсоров на МЭМС, в т. ч. спектральной и кадровой частотой сенсоров ИК-изображения можно управлять, совместив в одной конструкции собственно сенсор с оптическим фильтром-резонатором и изменяя напряжение на полевом электроде МЭМС;
- структуры «кремний на изоляторе» (КНИ) — наилучшая подложка для изготовления термопарных ИК-сенсоров, позволяющая в приборном слое сформировать как сами монокристаллические термопары, так и ИС считывания сигнала;
- использование только технологии кремния и сопутствующих ей материалов (нитрид кремния, а не сульфид свинца, например) обещает в производстве достижение больших форматов матриц при их невысокой стоимости;
- проведен теоретический анализ и моделирование различных типов тепловых ИК-сенсоров на кремниевых МЭМС, разработаны топологии и лабораторная технология, изготовлены фотошаблоны и экспериментальные образцы, исследованы и измерены их характеристики и параметры.

Актуальность исследования обусловлена достоинствами, сочетающими достаточно высокие характеристики приборов, зрелую кремниевую технологию

и потенциально низкую стоимость. Потребность в сенсорах ИК-изображения именно в настоящее время чрезвычайно высока в связи с текущими событиями.

Во всех разработках в качестве поглощающего ИК-излучение материала использован слой нестехиометрического нитрида кремния, см. рис. 1а. Исследования и разработки по выбранному типу термочувствительного элемента на МЭМС прошли две стадии: 1) биморфные структуры с электрическим и с оптическим считыванием (в «макроисполнении») они известны как биметаллическая пластинка и поворотное зеркало) и 2) термопара.

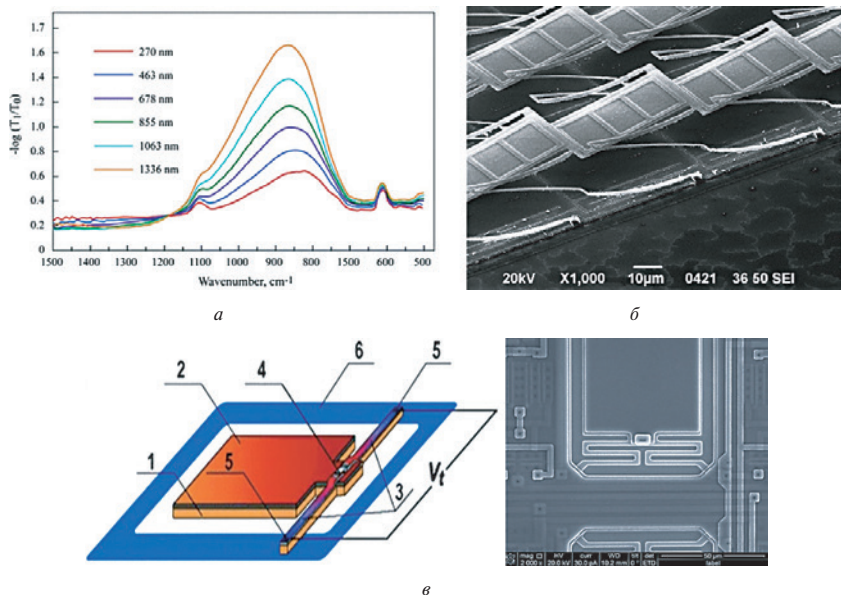


Рис. 1. Спектральные зависимости поглощения ИК-излучения слоев нитрида кремния для различных значений их толщины (а); элементы биморфных МЭМС (б); схема МЭМС-термопарного элемента (1 — мембрана; 2 — поглощающий слой; 3 — кантилеверы с термопарой; 4 — горячий контакт; 5 — холодные контакты; 6 — подложка) и фрагмент кристалла с матрицами формата 64×64 (в)

Первым исследовал возможность применения микротермопар в ИК-сенсорах в 90-е годы В. К. Дмитриев в НИИ физических проблем. Сейчас лидером рынка терморных ИК-матриц (формат до 120×84) является компания Heimann Sensor, Германия, <https://www.heimannsensor.com>.

Ввиду ограничения объема тезисов приведем здесь лишь один пример разработки — моделирование конструкции и работы управляемого теплового ИК-сенсора на МЭМС.

Трехмерные графики электростатической деформации мембраны при напряжении $V = 15$ В для двух вариантов выбранных топологий чувствительного МЭМС-элемента проиллюстрированы на рис. 2а–б как пример результатов моделирования.

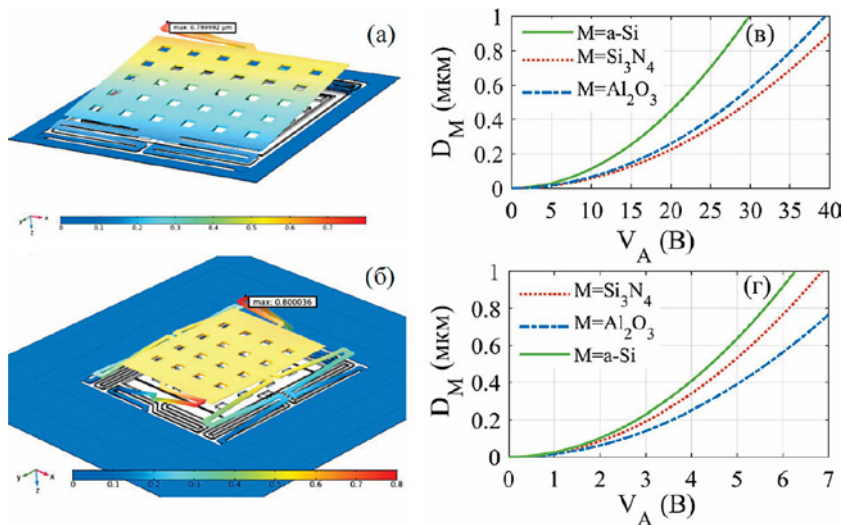


Рис. 2. Иллюстрация электростатической деформации мембраны в первом (а) и втором (б) варианте конструкции микросистемы при пороговом напряжении V_n , соответствующем контакту мембраны с дном полости. Деформация мембраны в первом (е) и втором (z) варианте конструкции микросистемы как функция от управляющего напряжения, где М — варьируемый материал многослойной диэлектрической мембраны

Доклад будет иллюстрирован существенно подробнее и снабжен литературными ссылками (около 25 шт.).

Утверждена программа повышения квалификации «Инфракрасные сенсоры на кремниевых МЭМС», и приглашение на этот курс в объеме 72 часов опубликовано на сайте МИЭТ: <https://miet.ru/page/141392>, https://miet.ru/list_programs/electronics/infekrasnyye_sensory_na_kremnievyh%20MEMS.

Полный список литературы (в основном авторов — участников работ) прилагается к докладу, входит в курс повышения квалификации, а ссылки на опубликованные работы содержатся на портале <https://elibrary.ru/authors.asp> (поиск по ФИО авторов).

Цикл упомянутых в данном обзоре работ выполнен при поддержке Национального исследовательского университета «МИЭТ». Докладчик благодарен за многолетнее сотрудничество коллегам, среди которых Хафизов Р. З., Федирко В. А., Золотарёв В. И., Рудаков Г. А., Белин А. М., Лапшин Р. В., Свидзинский К. К., Демин Г. Д.



УДК 621.3.049.76

Технологические особенности процессов металлизации и формирования вертикальных соединений в 3D-микросборках с торцевой коммутацией

Вертянов Д. В., Беляков И. А., Жумагали Р. Н., Кочергин М. Д.,
Тимошенков С. П.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

vdv.vertyanov@gmail.com, igor-terra@yandex.ru

Рассмотрены процессы химического осаждения меди и формирования топологии при изготовлении микросборок с торцевой коммутацией. Показано влияние материала герметизации и параметров процесса осаждения на качество покрытия и последующей топологии, формируемой методами литографии или лазерной обработки.

Ключевые слова: корпусирование; трехмерная интеграция; эпоксидный компаунд; химическая металлизация диэлектрика; лазерная обработка.

Введение

При реализации технологий трехмерной интеграции часто возникает необходимость формирования металлизации на поверхности эпоксидного компаунда, который служит одним из основных конструкционных материалов микросборок, изготавливаемых по технологиям внутреннего монтажа, монтажа «корпус на корпусе» (PoP — Package-on-Package) или по технологиям торцевой коммутации [1].

Основная проблема заключается в том, что изначально эпоксидные монолитизирующие компаунды не предназначены для осаждения на них слоев металла. И хотя по своему составу они схожи со стеклотекстолитом печатных плат, их органическая матрица и неорганический наполнитель существенно отличаются от таковых в стеклопластике.

В рамках данной работы исследованы процессы формирования медной металлизации толщиной от 10 до 30 мкм на поверхности эпоксидных компаундов различного состава (на основе разных эпоксидных смол и наполнителей). Также исследовано влияние состава раствора и предварительной обработки заготовок в протоморе адгезии на качество металлизации.

Помимо исследования адгезии методом отрыва, образцы также изучались на предмет возможности формирования коммутации путем лазерного испарения металла и классической фотолитографии.

Описание экспериментов и полученных результатов

В работе процессы металлизации исследовались на заготовках из чистых отвержденных компаундов различного состава и на заготовках, представлявших собой полноценные тестовые микросборки с уровнями в виде печатных плат внутри (рис. 1).

Для экспериментов использовались эпоксидные смолы на основе бисфенола-А, модифицированные эфиракрилатом и фосфазеном, а также смолы на основе глицидиловых эфиров. В качестве наполнителей изучались частицы оксида кремния различной фракции, карбонитрида титана, нитрида бора и технического алмаза.



Рис. 1. Образцы тестовых микросборок после металлизации (неметаллизированные участки вокруг боковых ребер, закрытые от металлизации, служат для обеспечения последующего совмещения с фотошаблоном коммутации)

Металлизация проводилась после обработки образцов в растворе палладиевого активатора. При этом часть образцов перед активированием обрабатывалась промотором адгезии.

В качестве растворов металлизации исследовались составы на основе разных комплексообразователей, восстановителей, а также составы с введением различных стабилизаторов и замедлителей реакции восстановления.

Наилучшие результаты показали варианты процесса металлизации с использованием предварительной обработки в промоторе адгезии. При этом наиболее высокую адгезию продемонстрировали пленки, полученные из растворов на основе комплексообразователя трилон-Б с замедлителями. Восстановитель же не оказал значимого влияния на адгезию.

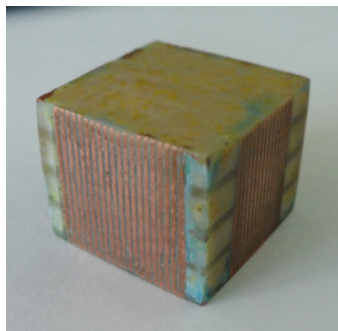


Рис. 2. Тестовая микросборка со сформированной на ней коммутацией

В ходе последующего формирования коммутации (рис. 2) было обнаружено, что на адгезию металла также значительно влияет смола, используемая в компанде. В частности, при лазерной обработке (формировании коммутации) металлизация начинает отслаиваться от менее термостойкого компаунда на основе



бисфенола-А, не содержащего в составе групп фосфазена. Причиной этого, вероятнее всего, стало отличие в температурном расширении компаунда и меди, которое у фосфазен-содержащих компаундов два раза ниже, чем у стандартных композиций на основе бисфенола-А.

Частицы наполнителя также оказывают заметное влияние на адгезию меди. Так, компаунды с содержанием частиц алмаза и карбонитрида титана показали низкую адгезию к ним медной металлизации, в то время как включение в состав оксида кремния или кубического нитрида бора, напротив, привело к повышению прочности сцепления металла с компаундом.

Заключение

Для успешной металлизации монолитизирующего эпоксидного компаунда и получения качественной вертикальной коммутации в трехмерных микросборках важно учитывать множество начальных факторов, начиная от состава компаунда и заканчивая методом формирования коммутации.

В то же время путем регулирования состава и применения предварительной обработки в промоторе адгезии можно значительно улучшить адгезию наращиваемой металлизации.

Литература

1. Semiconductor Advanced Packaging / edited by J. H. Lau. Springer, 2021. 513 p.

УДК 62-97/-98

Минимизация шероховатости боковых поверхностей формируемых структур в процессах глубокого анизотропного плазменного травления кремния

**Парамонов В. В., Сомов Н. М., Потапенко И. В., Голишников А. А.,
Путря М. Г.**

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

RJ1111@yandex.ru

В микроэлектронном производстве широко используется Bosch-процесс для глубокого анизотропного плазменного травления кремния. Однако гребешковые неровности (скэллопы), образующиеся во время травления, могут ухудшить выходные характеристики изделий. Предложен метод минимизации шероховатости боковых стенок на 61 %.

Ключевые слова: Bosch-процесс; минимизация шероховатости; боковые стенки.

Введение

Образование скэллопов является критичным для ряда устройств, например микрофлюидики в МЭМС-исполнении. Для осаждения неподвижных фаз необходима минимальная шероховатость поверхностей [1], которая может быть достигнута методами жидкостной полировки в растворах КОН или ТМАН [2]. Тем не менее в производстве многих изделий невозможно внедрить такие операции, т.к. это ведет к усложнению маршрута [3].

Для решения данной проблемы исследован и разработан процесс травления с минимизацией шероховатости боковых стенок. При этом было необходимо обеспечить вертикальность профиля травления с углом наклона стенок 89–90°, высокие значения равномерности травления, селективности к фоторезистивной маске и минимальную шероховатость дна.

Исследование Bosch-процесса для минимизации шероховатости

В работе исследовалось влияние времени стадии травления, рабочего давления в реакторе, ВЧ-мощности смещения, расхода кислорода на стадии травления на размеры шероховатости боковых стенок. Установлены ключевые параметрические зависимости. Для травления кремния использовалась установка Sentech SI500. Суммарная площадь травления занимала ~65% от площади пластины $\varnothing 100$ мм. При проведении исследований процесса ГАПТ Si на стадии травления варьировались время шага травления $t_{\text{тр}}$, давление $P_{\text{тр}}$, расход кислорода Q_{O_2} , ВЧ-мощность на столике $W_{\text{см}}$. На основе полученных результатов разработан процесс ГАПТ Si с минимальной шероховатостью боковых стенок (табл. 1, режим 9).

На рис. 1 представлены РЭМ-фотографии профилей щели до и после минимизации шероховатости.

Таблица 1. Результаты отработки режимов травления

№ режима	$W_{ис}$, Вт	$W_{см}$, Вт	$t_{тр}$, с	$P_{тр}$, Па	Q_{O_2} , см ³ /мин	Q_{SF_6} , см ³ /мин	Q_{Ar} , см ³ /мин	I_{max} , мкМ	I_{min} , мкМ	$I_{ср}$, мкМ	b_{max} , мкМ	b_{min} , мкМ	$b_{ср}$, мкМ	h , мкМ	$V_{тр}$, мкМ/мин
1	800	5	9	7	20	250	10	1,84	1,12	1,48	0,52	0,38	0,45	74	6,84
2	800	5	7	7	20	250	10	1,58	0,9	1,24	0,44	0,32	0,38	62	6,78
3	800	5	4	7	20	250	10	1,12	0,68	0,9	0,36	0,24	0,3	45	6,75
4	800	5	4	5	20	250	10	1,05	0,6	0,84	0,32	0,22	0,27	42	6,3
5	800	5	4	3	20	250	10	0,9	0,54	0,72	0,27	0,19	0,23	36	5,4
6	800	10	4	3	20	250	10	0,96	0,6	0,78	0,27	0,17	0,22	39	5,80
7	800	30	4	3	20	250	10	1,16	0,56	0,85	0,22	0,1	0,16	42,5	6,38
8	800	30	4	3	0	250	10	1,06	0,62	0,84	0,56	0,24	0,4	42	6,27
9	800	30	4	3	10	250	10	1,18	0,56	0,87	0,27	0,19	0,23	43,3	6,5

I_{max} , I_{min} , $I_{ср}$ — максимальная, минимальная и средняя длина скэллопов; b_{max} , b_{min} , $b_{ср}$ — максимальная, минимальная и средняя глубина скэллопов; h — глубина травления.

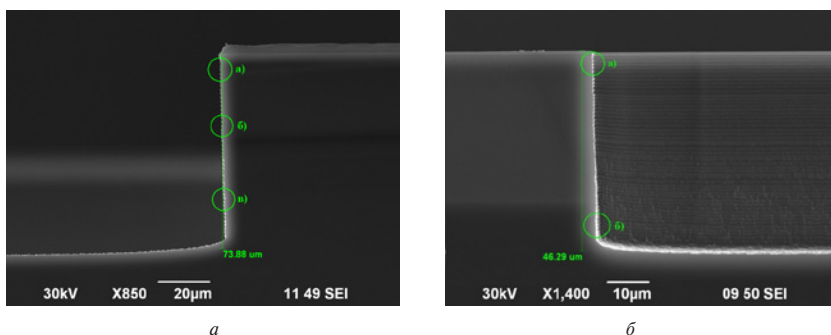


Рис. 1. Профили щели: а) до минимизации шероховатости, б) после минимизации

Заключение

Разработан процесс ГАПТ кремния с достаточной селективностью, неравномерностью травления до 3%, отсутствием «черного кремния» на дне с минимальными размерами скэллопов: длина 0,375–0,810 мкм, глубина 0,115–0,250. Данный процесс легко интегрируется в технологический маршрут и может быть применен в технологии КМОП и изготовлении МЭМС-структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00189, <https://rscf.ru/project/23-29-00189>

Литература

1. Dziuban Jan, Mróz J., Szczygielska M., Małachowski M., Górecka-Drzazga Anna, Walczak R., Buła W., Zalewski D., Nieradko Lukasz, Łysko Jan, Koszur J., Kowalski P. (2004). Portable gas chromatograph with integrated components // Sensors and Actuators A-physical. 115. 318–330. 10.1016/j.sna.2004.04.028.
2. Tanaka Hiroyuki, Ogiso Hisato, Nakano Shizuka, Hayami Toshihiro, Miyazaki Toshiya, Khumpuang Somawan, Hara Shiro. (2016). Scallop Reduction in Bosch Process Using a Small Chamber and Rapid Gas Switching Rate // IEEE Transactions on Sensors and Micromachines. 136. 499–504. 10.1541/ieejmas.136.499.
3. Etch Overview for Microsystems (n.a) Southwest Centers for Microsystems Education.

УДК 53.087.9, ГРНТИ: 59.14.21, 47.49.31, 47.41.99

Создание сенсорной системы позиционирования и интерпретации жестов

Чельшев Л. С.^{1,2}

¹ АО «Завод ПРОТОН»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 8
leonid.chelyshev@live.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Описана разработка и исследование устройства ввода информации. В состав входят: МЭМС-акселерометр, гироскоп, контроллер, устройства ввода/вывода информации. Устройство передает данные, снятые с руки оператора (наклон, перемещение, взаимодействие) для последующей обработки в ЭВМ. Важно отметить возможное применение таких устройств как в исключительно виртуальном пространстве, так и в реальных изделиях (БПЛА)

Ключевые слова: инерциальные датчики; МЭМС; устройство ввода информации; VR; БПЛА.

Введение

На данный момент существует большое количество средств ввода информации: мыши и джойстики, геймпады, клавиатуры, тачпады, однако для работы в трехмерном пространстве современные решения подходят слабо.

Получение опыта и данных о работе устройства является очень важной задачей в рамках этих компетенций. Именно применение данных устройств даст возможность быстрого и комфортного ввода информации при работе с 3D-пространством (как в рамках чисто виртуальных пространств, так и при работе с реальными устройствами, например БПЛА).

Разработка устройства

Для начала была создана модель и промоделировано устройство. Для разработки был взят программный комплекс Altium Designer. Было разработано устройство, основанное на микроконтроллере STM32F103C8T6, акселерометре ADXL345, гироскопе L3G4200D. 3D-модель созданного модуля представлена на рис. 1.

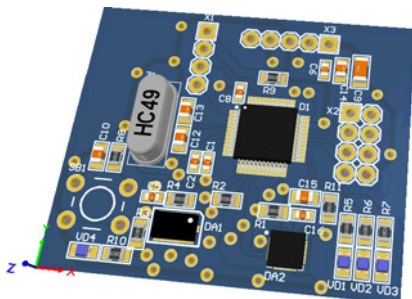


Рис. 1. 3D-модель прототипа устройства отслеживания движений

Размер созданного модуля — порядка 35×30 мм. Данный размер дает возможность иметь компактное устройство, у которого не будет возникать проблем с удобством применения.

Модуль был вставлен в изделие, которое представлено на рис. 2–3.



Рис. 2. Позиционирование модуля внутри корпуса прототипа изделия



Рис. 3. Готовый прототип изделия

На данный момент прототип изделия имеет характеристики, показанные в табл. 1.

Как можно заметить, оператору достаточно функций, которые он способен использовать. Единственное ограничение заключается в том, что скорость их переключения немного ниже относительно классического способа нажимания на кнопки, однако это компенсируется возможностью назначения различных функций и их комбинаций.



Таблица 1. Характеристики прототипа разработанного устройства

Характеристика	Значение, единица измерения
Используемый микроконтроллер	STM32F103C8T6
Частота работы микроконтроллера	72 МГц
Оперативная память микроконтроллера	20 Кб
Тип акселерометра	3-осевой цифровой
Тип гироскопа	3-осевой цифровой
Чувствительность акселерометра	256 ($\pm 2g$) LSB/g
Чувствительность гироскопа	8,75 mdps/digit
Выходные интерфейсы	UART(9600-115200), USB
Количество функций оператора	~ 120

В рамках работы проведены первичные испытания систем, а именно акселерометра, гироскопа, интерфейсов управления. Прибор показал свою работоспособность и готовность к итоговым испытаниям.

Помимо этого, начата работа по созданию итоговой версии устройства. 3D-модель показана на рис. 4.

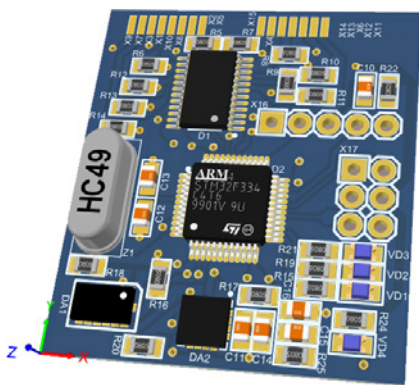


Рис. 4. Версия итогового устройства

В данной версии есть возможность подключить намного большее количество функций относительно прототипа, которых хватит для всех потребностей оператора.

Литература

1. Чельшев Л.С. Программно-аппаратный комплекс распознавания движений // Сборник тезисов участников XXIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2017», секция «Физика», 2017. — 227 с. — URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2017/data/section_31_10987.htm.

2. Галахова Н. Р. Обзор механизмов ввода и вывода в интерфейсах систем дополненной реальности // Новые информационные технологии в автоматизированных системах, 2016. — № 19. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mehanizmov-vvoda-i-vyvoda-v-interfeysah-sistem-dopolnennoy-realnosti> (дата обращения: 13.08.2023).
3. Алайцев И. К., Данилова Т. В., Мантуров А. О., Мареев Г. О., Мареев О. В. Алгоритм априорного обнаружения столкновений для систем виртуальной реальности с тактильной обратной связью // МНИЖ, 2016. — № 12–5 (54). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-apriornogo-obnaruzheniya-stolknoveniy-dlya-sistem-virtualnoy-realnosti-s-taktilnoy-obratnoy-svyazyu> (дата обращения: 13.08.2023).

УДК 621.3.049.75; 621.372.512.35; 621.315.61

Измерения диэлектрических характеристик материалов микрополосковых печатных плат

Метельков П. В.¹, Савельев М. В.¹, Сизов В. И.¹, к. т. н., Поликарпов Д. В.²¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**pavel_metelkov@mail.ru, maksimsaveliev34@gmail.com, vladimirsizov@mail.ru*² *ООО «Резонит»**124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6**dk@rezonit.ru*

Рассматривается методика измерений и электромагнитного моделирования микрополосковых тестовых структур на основе шлейфных и кольцевых резонаторов для оценки диэлектрических характеристик материалов в широком диапазоне частот. Показано хорошее совпадение результатов измерений и моделирования с характеристиками материалов, заявленными в их спецификациях.

Ключевые слова: СВЧ микрополосковые печатные платы; диэлектрические характеристики материалов; измерения и моделирование.

В связи с режимом санкций становятся недоступны ранее широко применявшиеся материалы СВЧ печатных плат американских фирм Rogers и Taconic. Они замещаются материалами других зарубежных и отечественных производителей. Измерение характеристик этих материалов — актуальная задача, позволяющая ответить на вопрос, как обеспечить совпадение расчетов микрополосковых линий и устройств с результатами измерений реальных образцов и в какой мере можно доверять приведенным в спецификациях характеристикам материалов.

Для оценки характеристик подложек микрополосковых печатных плат используются методы измерения резонансных частот шлейфных или кольцевых резонаторов [1, 2]. Измеренные S-параметры тестовых структур сравниваются с результатами моделирования тех же структур с подстройкой в моделях значений диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ для максимального соответствия измеренным данным.

Рекомендации этих двух работ использованы в настоящем исследовании.

Рассмотрены два варианта измерительных резонансных структур на печатной плате (рис. 1):

- на основе разомкнутого шлейфа, включенного в середину линии передачи;
- на основе кольцевого резонатора, включенного в разрыв линии передачи и слабо связанного с ней через зазоры с малой емкостью.

Изготовлены несколько тестовых структур на материалах с сопоставимыми характеристиками: RO4003С, WL-СТ338 и ФД-СВЧ-3,5 и измерены их S-параметры в диапазоне частот 3–30 ГГц.

Измерения проведены с помощью векторного анализатора цепей Anritsu MS46122A. Для подключения использованы СВЧ торцевые соединители 1493-01A-6 фирмы Southwest Microwave (типоразмер 2,40 мм, полоса частот до 50 ГГц).

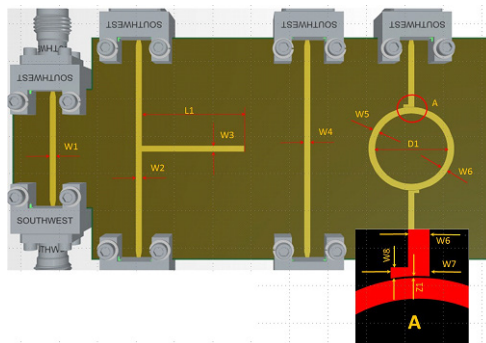


Рис. 1. Топология и характерные размеры изготовленных структур

Моделирование тестовых структур производилось программой CST Studio Suite с подстановкой измеренных с высокой точностью размеров элементов топологий и толщин подложек. При расчете величины ϵ и $tg\delta$ варьировались для получения максимального приближения друг к другу измеренных и расчетных кривых S-параметров. В результате такого подбора получены оценочные значения характеристик материалов.

Моделирование как шлейфного, так и кольцевого резонатора дает одинаковые результаты оценки диэлектрических параметров материала плат.

Верификация метода проведена на материале фирмы Rogers RO4003C, соответствующие характеристики которого спецификации подтверждено многолетним опытом применения сотнями компаний в мире. Отмечена высокая точность совпадения расчетных S-параметров с результатами измерений тестовых структур при характеристиках материала $\epsilon = 3,59$ и $tg\delta = 0,008$ на частотах до 30 ГГц. Оценки диэлектрических характеристик материала не выходят за пределы технологических разбросов по данному производителю.

Материалы WL-СТ338 и ФД-СВЧ-3,5 имеют близкие характеристики, причем диэлектрическая постоянная $\epsilon = 3,62-3,63$ чуть выше, чем у RO4003C. Потери WL-СТ338 ($tg\delta = 0,007$) близки к RO4003C, а вот потери отечественного материала почти вдвое ниже: $tg\delta = 0,004$.

Эти материалы также могут быть применены на частотах до 30 ГГц.

При производстве СВЧ печатных плат, включающих в себя высокооборотные резонансные структуры, например фильтров и генераторов, имеет смысл сначала протестировать по описанной методике свойства материалов для уточнения размеров требуемых топологий, а уже на следующем этапе приступить к их производству из материала этого же листа или партии.

Литература

1. Измерение диэлектрической проницаемости подложек. — URL: <https://habr.com/ru/articles/722192>.
2. Рентюк В., Кунрод Д. Определение параметров материалов печатных плат в миллиметровом диапазоне // СВЧ Электроника, 2019. — № 3. — URL: <https://microwave-e.ru/materials/opredelenie-parametrov-materialov>.

УДК 621.397:621.383

КМОП фоточувствительные микросхемы и коммутаторы для низкотемпературных ИК-приемников разработки ООО «РТК Инпекс» и отечественного изготовления**Бородин Д. В., к. ф.-м. н., Осипов Ю. В., Барсуков Ю. А., Волкова С. Ю.**

ООО «РТК Инпекс»

141006, г. Мытищи, Олимпийский просп., 15, корп. 11, помещ. 3

rtcinpex@mail.ru

Создана серия КМОП фоточувствительных микросхем видимого спектрального диапазона форматов от 2×512 до 1280×1024 ячеек, а также криогенные коммутаторы форматов до 640×512 ячеек. Схемы реализованы на базе технологий АО «Микрон» в режиме фаундри.

Ключевые слова: фотосенсор; КМОП-фотоматрица; SIC; КМОП-фотосенсор.

1. В дополнение к ранее разработанным КМОП фоточувствительным схемам [1, 2] создан ряд фотосхем на базе технологий АО «Микрон», а именно:

- фотоматрица формата 1280×1024 ячеек $5,3 \times 5,3$ мкм с режимом «мгновенная фотография» (одновременное накопление фотозаряда во всех ячейках во время вывода видеоинформации предыдущего кадра);
- радиационно стойкие билинейки форматов 2×256 и 2×512 ячеек $6,5 \times 6,5$ мкм [3];
- фотоматрица формата 300×300 ячеек, позволяющая регистрировать 16 кадров изображения с субмикросекундными экспозициями и интервалами между кадрами;
- фотоматрица формата 752×582 ячеек $8,6 \times 8,3$ мкм — функциональный аналог ICX429 SONY;
- фоточувствительная 1024-канальная линейка с ячейками $8,0 \times 8,0$ мкм или $8,0 \times 164$ мкм и биннингом 8×1 (передана в производство);
- фоточувствительная 512-канальная линейка с 1000 выборками фотосигнала с минимальным интервалом ~ 10 наносекунд (закончена разработка).

Схемы переданы в ряд заинтересованных организаций для апробации. Так, в АО «ЦНИИ «Электрон» на базе фотоматрицы 1280×1024 создан макет телевизионного модуля, реализующего полноформатный режим с кадровой частотой от 16 до 48 кадров/с. На модуле реализованы режимы:

- однокадровый режим с запуском по внешнему импульсу;
- режим непрерывной работы с изменением времени накопления в пределах времени вывода кадра;
- малокадровый режим с большим временем накопления;
- «окно интереса».

В фотосхемах использовался ряд разработанных конструкций фотодиодов (ФД). На рис. 1 для ФД_4 приведены квантовые эффективности η для длин волн λ 470, 525 и 660 нм, полученные из сравнительных измерений с рип-фотодиодом S5973 (Hamamatsu), а так же η самого S5973. Относительная чувствительность разных конструкций фотодиодов для λ 470 и 660 нм приведена на рис. 2.

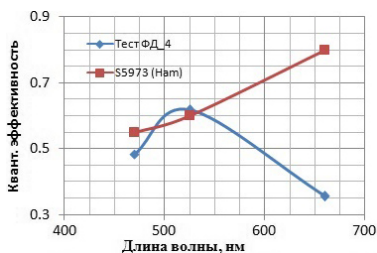


Рис. 1

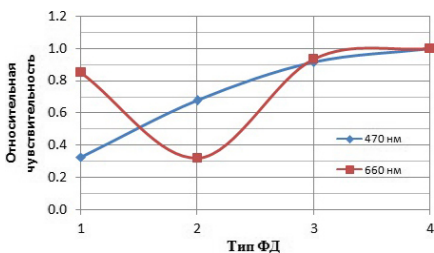


Рис. 2

В целом ФД показывают хорошую квантовую эффективность при $\lambda = 470$ – 600 нм. Для увеличения η при $\lambda > 600$ – 650 нм необходимо введение в имеющийся техпроцесс дополнительных операций.

2. Специалисты ООО «РТК Инпекс» занимаются разработкой аналого-цифровых КМОП-схем с криогенной рабочей температурой начиная с 1980-х годов, когда были создан ряд аналоговых схем с рабочей температурой менее 20 К (жидкий водород) для системы «Энергия — Буран». Развитие технологии инфракрасных фотоприемников в дальнейшем позволило перейти к рабочим температурам ~ 77 К. В результате для считывания сигналов с линеек, субматриц и матриц ИК-фотоприемников было создано более 15 типов коммутаторов, в том числе формата 640×512 ячеек размером 20×20 и 15×15 мкм [4]. Одной из последних разработок, реализованной в режиме фаундри на АО «Микрон», является коммутатор формата 640×512 ячеек размером 15×15 мкм для диодов типа «N на P-подложке». Основные функциональные возможности коммутатора:

- режим работы упрощенный (по умолчанию) или командный;
- четыре коэффициента преобразования (усиления) фотозаряда в напряжение;
- два режима интегрирования (во время или после считывания данных) с регулируемым временем накопления;
- режим «мгновенной» фотографии;
- считывание видеоданных на один, два или четыре выхода;
- изменение направления считывания видеоданных по горизонтали и вертикали;
- оконный режим считывания с регулируемым положением и размером.

Созданные микросхемы предназначены для систем технического зрения, систем тепловидения и др.

Литература

1. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Скрылёв А. С., Васильев В. В. КМОП микросхема матричного фотоприемника видимого диапазона формата 256×256 // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2009. — Вып. 1 (222). — С. 93–96.
2. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Васильев В. В. Микросхема КМОП-фотоприемника видимого диапазона формата 1280×1024 с размером ячейки 13×13 мкм // Прикладная физика, 2016. — № 2. — С. 76–81. — URL: <http://applphys.orion-ir.ru/appl-16/16-2/PF-16-2-76.htm>.



3. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Барсуков Ю. А. КМОП фоточувствительные билейки форматов 2×256 и 2×512 отечественного производства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2021. — № 3 (262). — С. 57–60.
4. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Васильев В. В. Матричный КМОП мультиплексор формата 640×512 ячеек для гибридных фотоприемных устройств // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2011. — Вып. 1 (226). — С. 45–50. — URL: [http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/Journal_1\(226\)-2011.pdf](http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/Journal_1(226)-2011.pdf).

УДК 621.3

Анализ распределения температуры в трехмерной микросистеме с несколькими функциональными уровнями

Евстафьев С. С., к. т. н., Соловьев И. А., Вертянов Д. В., к. т. н.*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1**madcatse@gmail.com*

Исследованы тепловые потоки в микросборках, проведен анализ и определены точки наибольшего нагрева. Предложены методы оптимизации теплового режима для улучшения работы микросборок в условиях высоких температур.

Ключевые слова: микросборка; тепловой анализ; конечно-элементный анализ; температурные градиенты; охлаждение.

Введение

Современные электронные средства становятся все более компактными и функциональными. Одним из ключевых методов уменьшения размеров является трехмерная интеграция нескольких функциональных блоков в одну микросборку. Однако в таких системах одной из ключевых проблем становится выделяемое компонентами тепло, которое может как представлять проблемы для работы устройства, так и создавать нежелательные тепловые деформации, приводящие к преждевременному выходу устройства из строя. Анализ распределения температуры снаружи и внутри микросборки является важным шагом при проектировании таких устройств [1].

Объект и методы исследования

Объектом исследования является микросборка, состоящая из нескольких модулей, вертикально соединенных между собой с помощью торцевой коммутации [3, 4]. Конечно-элементный тепловой анализ микросборки был проведен путем моделирования каждого уровня отдельно и их соединения друг с другом. Для этого использовались трехмерные модели, полученные из специализированного конструкторского САПР. Уровни были соединены между собой с использованием торцевой коммутации и заливки компаундом.

Затем был проведен анализ тепловых потоков внутри микросборки, который позволил определить температурные градиенты и точки наибольшего нагрева. Было учтено, что каждый уровень может иметь свои особенности и требования к тепловому режиму.

Для оптимизации теплового режима микросборки могут быть использованы различные методы, например изменение материалов или геометрии уровней, добавление дополнительных элементов охлаждения и т. д.

Заключение

Таким образом, проведенный в ходе работы конечно-элементный тепловой анализ позволит оптимизировать работу будущей микросборки. Благодаря точному анализу локальных точек перегрева можно на этапе проектирования оценить возможные проблемы конечного устройства и предпринять ряд действий, направленных на их минимизацию. Таким образом, результаты проведенного исследования могут быть использованы в дальнейшем для улучшения работы микросборок в условиях высоких температур.



*Работа проводилась при финансовой поддержке Минобрнауки
в рамках государственного задания FSMR-2022-0002*

Литература

1. Корляков А. В. Проектирование элементов микро- и наносистем. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2022. — 122 с.
2. Евстигнеев Д. А., Карачинов В. А., Варшавский А. С. Моделирование теплофизических характеристик микросистемы на основе карбида кремния в условиях направленных тепловых потоков // Вестник Новгородского государственного университета, 2018. — № 3 (109). — С. 16–19.
3. Вертянов Д. В., Евстафьев С. С., Лабутин Д. С., Силантьев А. М. Особенности теплового анализа 3D микросборки вычислительной системы с бескорпусной программируемой логической интегральной схемой // Инженерный вестник Дона, 2022. — № 11 (95). — С. 338–348.
4. Вертянов Д. В., Сидоренко В. Н., Погудкин А. В. Исследование процессов герметизации и химикогальванической металлизации наполненных эпоксидных смол для трехмерных микросборок с торцевой коммутацией // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8–2 (113). — С. 401–406.

УДК 681.7.068

ФКБ. Моделирование и проектирование**Шамин Е. С., Скуратов И. Д., Крылов А. А., Светиков В. В.***АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
yevgeniy.shamin@phystech.edu*

Моделирование элементов фотонной компонентной базы имеет ряд особенностей, уникальных для данной области. В работе проводится обзор основных подходов к расчету свойств и характеристик пассивных элементов интегральной фотоники. Рассматриваются общие вопросы, связанные с их проектированием. Приводится описание различных подходов к проектированию устройств фотоники, позволяющих достигать требуемых характеристик. Проводится сравнение эффективности описанных подходов на примере решения конкретных задач.

Ключевые слова: фотоника; планарная технология; фотонная компонентная база; пассивные элементы фотоники.

Введение

Большинство расчетных задач интегральной фотоники могут быть решены одним из двух следующих численных методов моделирования: FDTD и Veam propagation (или BPM). Первый алгоритм — FDTD — имеет высокую точность и отсутствие ограничений на постановку задачи, однако требователен к вычислительным ресурсам. BPM обладает приемлемой точностью моделирования и менее требователен, однако для моделируемых структур должно выполняться условие параксиального приближения. Также данный алгоритм не способен решить задачу, содержащую множественные переотражения света. В данной работе будет представлено подробное сравнение двух описанных методов.

Подходы к проектированию устройств интегральной фотоники на примере фотонного сплиттера

Оба описанных подхода требуют реализовать параметризованную модель устройства и, в частности, описать функцию генерации его топологии. Также необходимо определить алгоритм расчета параметров устройства, который может сводиться как к простому применению описанных выше расчетных методов, так и к реализации сложной системы, например подразумевающей наличие в том числе аналитических расчетов.

Можно выделить три подхода к проектированию устройств интегральной фотоники. Первый — полный перебор всех параметров модели устройства. Такой подход может сработать, если число параметров в модели мало. Однако даже таким образом в рамках лаборатории фотоники ЗНТЦ был спроектирован сплиттер на основе волноводов с контрастностью 0,3% и полными потерями 0,22 дБ, что потребовало 10000 симуляций (перебор четырех параметров по десять значений). Второй подход к проектированию — оптимизация. Этот подход решает проблему поиска решения в пространстве параметров сравнительно высокой размерности, в особенности в случае применения эволюционных алгоритмов [1]. Так, в работе [2] на основе алгоритма particle swarm был спроектирован сплиттер на базе



волноводов высокой контрастности (волноводная структура на основе КНИ с толщиной 220 нм) с полными модельными потерями 0,13 дБ. Для этого потребовалось всего 1500 симуляций. Третий и самый перспективный на сегодняшний день подход — оптимизация, основанная на специфичной для задачи информации. Так, в работе [3] на основе такого алгоритма был разработан сплиттер на основе волноводов высокой контрастности (волноводная структура на основе КНИ с толщиной 220 нм) с полными модельными потерями 0,07 дБ, что потребовало всего 102 симуляций.

Заключение

В работе представлен обзор методов моделирования пассивных ФИС. Приведено описание существующих подходов к проектированию ФИС.

Литература

1. Stanovov V. et al. Why don't you use Evolutionary Algorithms in Big Data? // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017. Vol. 173. № 1. P. 012020.
2. Zhang Y. et al. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide // Optics express, 2013. Vol. 21. № 1. P. 1310–1316.
3. Lalau-Keraly C. M. et al. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design // Optics express, 2013. Vol. 21. № 18. P. 21693–21701.

УДК 53.04; 53.06; 538.9

Перспективные элементы нанoeлектроники на базе нанокристаллов антимонида индия

Жуков Н. Д.

ООО «НПП Волга»

Саратов

ndzhukov@rambler.ru

На основе наноячейки с адресно-размещенными квантоворазмерными нанокристаллами с эффектами квантовой проводимости и зарядовых осцилляций предлагаются элементы нанoeлектроники, одноэлектронный мемристор, однофотонный излучатель и болометр, нанооптопара.

Ключевые слова: квантоворазмерный нанокристалл; квантовая проводимость; блоховские осцилляции; одноэлектронный мемристор; однофотонный излучатель; однофотонный болометр.

По основам нанoeлектроники издано большое количество книг, в которых содержатся обзоры обширной периодической литературы [1]. Известно множество публикаций по научным и методическим вопросам электронного транспорта в проводниках [2]. Все эти рассуждения, однако, не выходят за рамки баллистической и диффузионной моделей, от которых нет прока в практическом смысле. На наш взгляд, новые практические результаты можно получать только на трехмерных квантоворазмерных структурах, к которым в первую очередь нужно отнести полупроводниковые нанокристаллы (NC), по которым в последние несколько лет наблюдается информационная активность [3].

Движение электрона внутри NC нами рассматривается как волновой колебательный процесс в глубокой протяженной потенциальной яме в нескольких специфических вариантах, в частности квантового резонанса, блоховских осцилляций, электронного разогрева. Квантово-резонансное движение электрона нами названо квантовой проводимостью с ее описанием моделью квантовой нити [4]. При этом наиболее подходящим вариантом являются нанокристаллы антимонида индия, имеющего лучшие параметры размерного квантования [5]. Анализы проводились на основе измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) на туннельном микроскопе в режиме эмиссии электронов из зонда и их инжекции в NC.

На рис. 1 приведены типичные варианты ВАХ для NC-InSb, имеющих особенности в виде отдельных резких пиков и квазипериодических пульсаций тока (кривые 1, 2). Различия по типам ВАХ мы объясняем степенью проявления размерного квантования: кривые типа 1* — его отсутствия, 1, 2 — наличия.

В нашем варианте предлагается наноячейка с квантоворазмерными NC с их адресным размещением методом ПЛБ-монопленок. Такая наноячейка может стать основой для формирования чипа наносхемы на одноэлектронном и однофотонном принципах. При этом рабочими в наносхеме будут следующие нанoelementы.

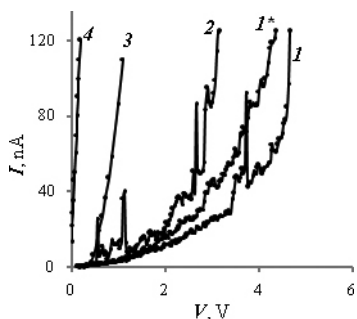


Рис. 1. ВАХ: 1,1*,2 — NC-InSb; 3 — тест субмикро-InSb; 4 — тест ИТО

Элемент памяти — электронный мемристор

Обычно используются оксидные наноматериалы, изменяющие свою структуру и, соответственно, сопротивление под действием напряжения. NC в своем исходном состоянии не проводит и становится проводящим, если инжектировать в него электрон, который, однако, под действием поля туннелирует из него через некоторое ультракороткое время его резонансного движения в NC. Если этим временем ограничить воздействие напряжением, то электрон останется в NC как в глубокой протяженной потенциальной яме и это состояние сохранится, пока не будет приложен импульс напряжения большей, чем при записи, длительности. Такой мемристор можно назвать электронным.

Элементы нанооптопары — однофотонные излучатель и болометр

В квантовомразмерном нанокристалле благодаря резонансному движению в нем инжектированного электрона происходят осцилляции заряда. При этом такой квантовый осциллятор излучает пофотонно в дальнем инфракрасном и терагерцевом спектрах. В таком же нанокристалле под действием излучения происходит электронный «разогрев», обуславливающий изменение положения резонансного пика на ВАХ. Эффект проявляется как фотонный болометр. Кроме ультравысокого (пикосекундного) быстродействия излучение такой оптопары параметрировано, и можно ожидать, что она не будет реагировать на внешние сторонние воздействия, что важно для криптографии.

Литература

1. Смирнов А. И. Наноэлектроника, нанофотоника и микросистемная техника. — М.: Инфра-инженерия, 2023. — 268 с.
2. Кругляк Ю. А. Наноэлектроника «снизу — вверх». — Одесса: ТЭС, 2015. — 536 с.
3. Montanarella F., Kovalenko M. V. Three Millennia of Nanocrystals // ACS Nano, 2022. 16 (4), 5085.
4. Zhukov N. D., Gavrikov M. V., Rokakh A. G. // Technical Physics Letters, 2023. 49 (2), 31.
5. Krylsky D. V., Zhukov N. D. // Technical Physics Letters, 2020. 46 (9), 901.

УДК 51.097.9

Разработка и исследование кремниевых микроакселерометров для создания комплексированных интеллектуальных МЭМС**Ие Ко Ко Аунг¹, Орлов В. О.², Челышев Л. С.²**¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
yekokoaung64675@gmail.com, vorlov@niime.ru*

В данной работе проведен анализ разработки и применения МЭМС при создании сложнофункциональных интеллектуальных инерциальных систем. В работе приводятся конструктивные особенности и технологические методы получения микроакселерометров, а также их применение в различных областях. Микроакселерометры могут быть использованы в электронных системах на основе инерциальных МЭМС, комплексированных со спутниковыми навигационными системами, предназначенных для определения положения объектов в пространстве.



УДК 681.2

Низкотемпературный термокомпрессионный бондинг с применением индия для герметизации в технологии МЭМС

Кошелев В. А.^{1,2}, Парамонов В. В.^{1,2}, Филиппов Н. А.^{1,2}, Демин Г. Д.^{1,2},
Дюжев Н. А.^{1,2}, Чиненков М. Ю.^{1,2}

¹ ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
koshelev@ckp-miet.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследован и разработан процесс низкотемпературного термокомпрессионного бондинга для герметизации МЭМС-структур через слои индия. Рассмотрены варианты адгезионных подслоев Au, Ni и Ti. Получены зависимости силы сращивания от параметров бондинга и проведен анализ образцов на наличие пустот.

Ключевые слова: индий; оксид индия; взрывная литография; вакуумная герметизация; прочность соединения; герметичность бондинга; адгезионный слой.

Введение

Бондинг кремниевых подложек играет ключевую роль во многих передовых микроэлектромеханических системах (МЭМС). Данный метод обеспечивает упаковочное решение первого уровня, делая эти процессы экономически выгодными. Бондинг является основным решением для герметизации МЭМС-систем, в которых нежелательно влияние окружающей среды. В данной статье рассматривается термокомпрессионный вид бондинга. Для обеспечения оптимальных выходных характеристик требуется исследование ключевых параметрических зависимостей.

Особенности термокомпрессионного бондинга с применением индия

В термокомпрессионном (диффузионном) бондинге (ТКБ) механизм сращивания основан на атомарном взаимодействии металлов, нанесенных на поверхность двух образцов. Образцы приводятся в контакт с одновременным применением силы и тепла для обеспечения движения атомов [1–3].

Чаще для бондинга применяются покрытия из алюминия как наиболее предпочтительного благодаря высокой скорости диффузии, мягкости и пластичности. Но его применение в качестве связующего слоя требует температур более 400 °С и большой приложенной силы от 2000 Н/см², чтобы обеспечить достаточное герметичное соединение. Поэтому для достижения высококачественного низкотемпературного ТКБ необходим выбор материала, с использованием которого допускается проводить процесс сращивания при температурах ниже 200 °С и меньшее давление. Для достижения целей на кристаллах кремния были созданы тонкие пленки индия (рис. 1а), в том числе с подслоями Au (рис. 1б, в), Ni (рис. 1з), Ti (рис. 1д), и проведен ТКБ по указанным схемам (рис. 1).

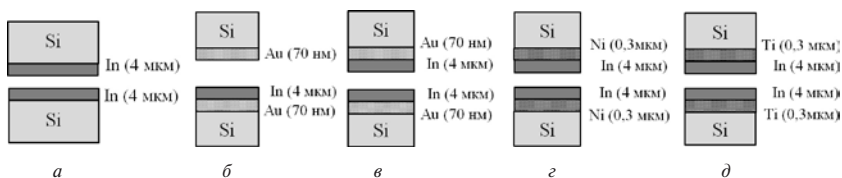


Рис. 1. Схематическое размещение кристаллов перед бондингом. Кристаллы с In (а). Подслои для улучшения адгезии индия Au (б, в), Ni (г), Ti (д)

Учитывая такие проблемы, как высокая температура плавления InO и значительное давление, необходимое для разрушения оксидной пленки (от 1960 Н/см²), был предложен ряд методов для разрушения поверхностного оксида:

- 1) устранить InO с поверхности, применяя поверхностные активные вещества;
- 2) увеличить толщину In для достаточной растворимости пленки InO в толще материала.

Еще одной важной проблемой является адгезия пленки In к кремниевой подложке, поэтому рассмотрены подслои Au, Ni, Ti для улучшения данного параметра.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сформулировать ряд рекомендаций по работе с функциональными слоями In при изготовлении устройств и компонентов микроэлектроники с использованием ТКБ.

При отсутствии предварительной обработки и толщине слоя индия до 4 мкм можно гарантировать сращивание кристаллов площадью 100 мм² при следующих рабочих параметрах: температура процесса — 180 °С, сила прижатия — 1960 Н/см², время процесса — 30 мин.

Как показано в исследовании, использование Au в качестве подслоя и увеличение слоя In до 4 мкм позволяет достичь низкотемпературного термокомпрессионного бондинга при температуре 160 °С с прочностью соединения, пропорциональной силе разрыва 108 Н/см².

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СНН.21.0004)

Литература

1. Liang C., Zappella P. Advanced Packaging Solution to Hermetically Packaging Micro-electronic Devices // IEEE T COMP PACK MA, 2021. Vol. 11. № 7. P. 1055–1062. DOI: 10.1109/TCPMT.2021.3091593.
2. Долговых Л. И., Виноградов А. И., Зарянкин Н. М., Михайлова М. С., Брыкин А. В. Особенности технологии эвтектического сращивания МЭМС // Нанотехнологии, 2019. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.549.550.
3. Патент «Термоанемометрический датчик расхода жидкостей и газов для экологического мониторинга». Гусев Е. Э., Дюжев Н. А., Беспалов В. А. — RU 200 149 U1, 2020.

УДК 537.621.2

Микромагнитные особенности эффекта гигантского магнитоимпеданса в тонкопленочной ферромагнитной структуре при различном направлении внешнего магнитного поля

Демин Г. Д., Федина А. Д., Лобанов Б. В., Дюжев Н. А.

ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база»,
НИУ МИЭТ124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, 6
demin@ckp-miet.ru

Проведено микромагнитное моделирование отклика чувствительного элемента датчика, работающего на эффекте гигантского магнитоимпеданса в аморфной ферромагнитной оболочке, на магнитное поле. Показан значительный рост чувствительности при переходе от параллельной к перпендикулярной конфигурации детектируемого поля и поля анизотропии.

Ключевые слова: микромагнитное моделирование; спиновая динамика; нелинейный гигантский магнитоимпеданс; ферромагнитная оболочка; магнитные сенсоры.

Введение

В связи с расширением областей применения сенсорных устройств (Интернет вещей (IoT), телемедицина (магнитоэнцефалография, магнитокардиография), беспилотный наземный транспорт и т. д.) актуальна разработка высокочувствительных магнитных датчиков, обеспечивающих детектирование сверхмалых магнитных полей (в диапазоне от нескольких пТл до нескольких нТл). При разработке датчиков магнитных полей привлекательным с практической точки зрения является эффект гигантского магнитоимпеданса (ГМИ) в тонкопленочных аморфных ферромагнитных (ФМ) структурах с повышенным содержанием Со, связанный с изменением их комплексного сопротивления Z (H_{DC} , H_{AC}) во внешнем магнитном поле H_{DC} при возбуждении в ФМ-оболочке структур спиновой динамики переменным полем H_{AC} от центральной токонесущей шины (рис. 1). Данный эффект в многослойных структурах типа «ФМ — диэлектрик — металл (шина) — диэлектрик — ФМ» достигает до 700 % и выше с полевой чувствительностью более 300 %/Э при комнатной температуре [1, 2].

В работе применяется микромагнитное моделирование для исследования динамики локализованных спинов ФМ-оболочки в составе структуры $CoFeSiB-SiO_2-Al-SiO_2-CoFeSiB$ и расчета выходного сигнала, генерируемого в считывающей катушке при изменении проходящего через нее магнитного потока за счет вариации проекции вектора намагниченности m_z под действием переменного поля H_{AC} .

Схема расчета выходного сигнала ГМИ-сенсора

Расчет трехмерных карт распределения магнитного поля $H_{AC} = H_{AC}(x, y, z, t)$ от токонесущей шины производился на основе решения уравнений Максвелла методом конечных элементов. Величина тока $I = I_0 \sin(2\omega t)$ была выбрана соответствующей получению величины поля $\max(H_{AC}) = 0,25H_{AN}$ при частоте тока $f = 10$ МГц, где $\omega = 2\pi f$, H_{AN} — поле магнитной анизотропии ФМ-оболочки. Размер ФМ-оболочки составлял $3,3 \text{ мкм} \times 2,4 \text{ мкм} \times 2,6 \text{ мкм}$, толщина ФМ-оболочки — $d_{FM} = 500 \text{ нм}$, количество витков

катушки $N_{\text{COIL}} = 50$. Для реализации данной задачи были выбраны следующие параметры ФМ-слоя (CoFeSiB): намагниченность насыщения $M_s = 560$ кА/м, коэффициент Гильберта $\alpha = 0.02$, обменная константа $A_{\text{EX}} = 1,3 \cdot 10^{-11}$ Дж/м, коэффициент одноосной магнитной анизотропии $K_{U1} = 280$ Дж/м³.

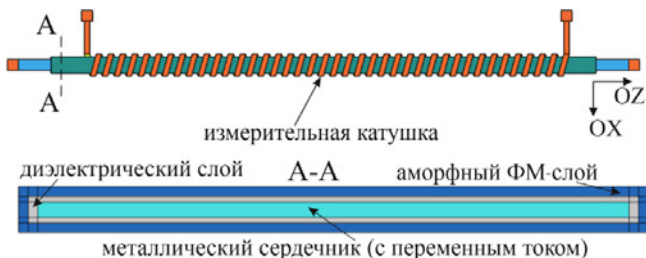


Рис. 1. Поперечный срез структуры чувствительного элемента (CoFeSiB-SiO₂-Al-SiO₂-CoFeSiB)

Для оценки четных и нечетных гармоник выходного сигнала V_{OUT} использовалось быстрое преобразование Фурье (FFT). Расчет производился при ориентации внешнего поля H_p перпендикулярно (ТТ) и параллельно (ТЛ) направлению поля анизотропии: $H_{\text{AN}} = H_{\text{AN}} \cdot e_x$, где $H_{\text{DC}} = k_{\text{DC}} \cdot H_{\text{AN}}$, а k_{DC} — коэффициент пропорциональности.

Результаты моделирования

На рис. 2 приведены результаты моделирования временной зависимости V_{OUT} для ТТ и ТЛ магнитной конфигурации для случая $k_{\text{DC}} = 0,4$ ($H_{\text{DC}} \approx 4$ Э). Как видно из рисунка, в случае ТЛ магнитной конфигурации выходной сигнал заметно выше, чем в случае ТТ. При этом в зависимости от k_{DC} при малых полях ($H_{\text{DC}} < H_{\text{AN}}$) преобладают нечетные, а при больших полях ($H_{\text{DC}} > H_{\text{AN}}$) — четные гармоники, что согласуется с экспериментом [3].

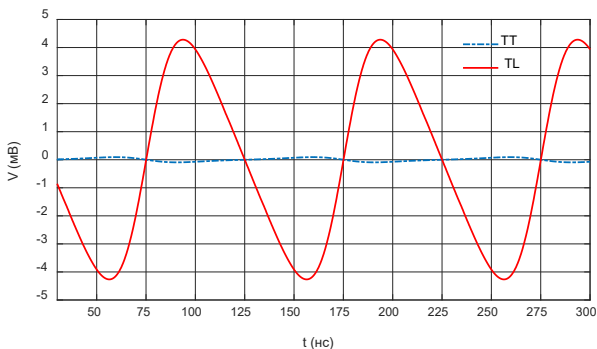


Рис. 2. Выходное напряжение V_{OUT} как функция от времени для ТТ и ТЛ магнитной конфигурации ($k_{\text{DC}} = 0,4$)



Заключение

Разработан оригинальный теоретический подход, сочетающий в себе численные расчеты неоднородного распределения $\mathbf{H}_{AC} = \mathbf{H}_{AC}(x, y, z)$ магнитного поля в поперечном срезе структуры ГМИ-сенсора и микромагнитное моделирование динамики спинов ФМ-оболочки в данном поле. Получено, что в области малых полей наблюдается значительное преобладание чувствительности в случае ТЛ магнитной конфигурации, когда внешнее магнитное поле направлено вдоль токонесящей шины.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2023–2025 гг.

(соглашение FSMR-2023-0003) с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ

Литература

1. Morikawa T., Nishibe Y., Yamadera H., Nonomura Y., Takeuchi M., Sakata J. and Taga Y. Enhancement of giant magneto-impedance in layered film by insulator separation // IEEE Trans. Magn, 1996. Vol. 32. № 5. P. 4965–4967.
2. Yokoyama H., Kusinoki K., Hayashi Y., Hashi S. and Ishiyama K. Magneto-impedance properties of thin-film type sensors using CoNbZr/SiO₂ multilayer films // J. Magn. Magn. Mater, 2019. Vol. 478. P. 38–42.
3. Buznikov N. A., Yon S. S., Lin L., Kim C. O. and Kim C. G. Generation of second harmonic in off-diagonal magneto-impedance in Co-based amorphous ribbons // J. Phys. D: Appl. Phys, 2006. Vol. 39. № 2. P. 237–242.

УДК 539.371

Влияние одномерных механических деформаций на конструкцию эластичного носителя с металлическими проводниками различной формы

**Горлов Н. С., к. т. н., Вертянов Д. В., д. т. н., Тимошенко С. П.,
Жумагали Р. Н., Гладкова С. И.**

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

gorlov.nikolai.s@mail.ru

Проведено исследование влияния одномерных механических деформаций на конструкцию эластичного носителя с металлическими проводниками различной формы. Определены зависимости максимальных возникающих напряжений в медных и золотых проводниках различной формы от приложенной нагрузки одноосного растяжения.

Ключевые слова: эластичные носители; кремнийорганический компаунд; механические деформации; полидиметилсилоксан; подковообразная форма; носимая биоэлектроника.

При формировании эластичных межсоединений в связи с непластичной природой металлов требуется особая структура проводников [1]. В случае когда соединения выполнены из твердых металлов, геометрия проводников должна быть изогнутой.

В научных работах по данной теме были рассмотрены различные конструкции эластичных межсоединений [2–4]. Особое внимание уделялось именно форме металлических проводников, т. к. они подвержены наибольшему механическому нагрузкам. В металле при растяжении могут возникать механические дефекты вплоть до полного разрыва структуры и потери электрического соединения.

Для выбора наиболее подходящей формы проводника было проведено исследование влияния приложенных механических деформаций к эластичным носителям с проводниками различной формы: подковообразная форма; треугольная форма с остроугольными, прямоугольными и скругленными вершинами; подковообразная форма с прямоугольными вставками в местах наибольших механических напряжений; форма прямоугольного меандра.

Структура эластичного носителя состоит из трех элементов: нижнего и верхнего слоя кремнийорганического материала (полидиметилсилоксан SYLGARD 184) и металлического проводника между ними (медь/золото).

Из полученных зависимостей (рис. 1) наблюдаем, что лучший результат с точки зрения механической прочности с наименьшими возникающими напряжениями среди рассмотренных показал проводник подковообразной формы. Отсутствие углов, резких изгибов и плавность формы вдоль всего проводника позволяют максимально компенсировать приложенные нагрузки на растяжение.

Также хороший результат наблюдался при моделировании растяжения структуры с подковообразным проводником, имеющим прямоугольные вставки. Возникающие напряжения были на 10–20% выше в зависимости от длины прямого участка, чем в подковообразном проводнике. Такая форма проводника может

применяться при трассировке критичных сигналов, где требуется строго выдерживать зазор в меандре между сегментами $\geq 3w$ для минимизации перекрестных помех.

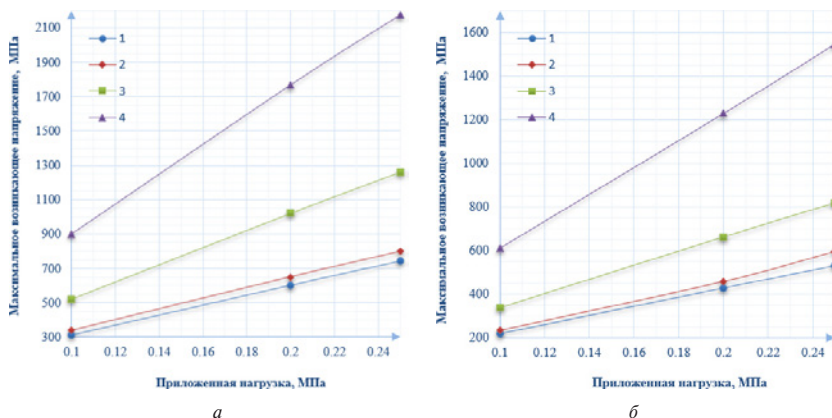


Рис. 1. Зависимость максимальных возникающих напряжений от приложенных нагрузок в медных (а) и золотых (б) проводниках разной формы: подковообразный (1), подковообразный с прямоугольными вставками (2), прямоугольный меандр (3) и треугольный (4)

Худшие результаты были получены в проводнике треугольной формы. При добавлении скруглений к вершине возникающие напряжения были меньше в 1,6 раза, чем без скругления, но результаты все равно сильно уступают другим формам.

Форма прямоугольного меандра также уступает подковообразной форме в плане механической надежности, но сильно меньше, чем треугольная, т. к. по двум вершинам растяжение распределяется более равномерно. Тем не менее выбор стоит остановить на форме скругленного меандра без прямоугольных вставок или с их наличием при необходимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00959)

Литература

1. Горлов Н. С., Вертянов Д. В., Тимошенко С. П. Эластичные основания и межсоединения в носимой биоэлектронике и перспективы их применения // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: Сборник трудов научно-практической конференции, Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус, 01–07 февраля 2022 года. — Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2022. — С. 112–118.
2. Ponomarev N., Vertyanov D., Nikolaev V., Timoshenkov S. Research of the Constructions of Conductors on Flexible Carriers // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018. P. 1626–1628.

3. Пат. WO 086416 A1, H05K 1/00. Stretchable Electronic Device / J. Vanfleteren, Bossuyt F., Axisa F.; заявитель и патентообладатель IMEC, UNIVERSITEIT GENT, J. Vanfleteren, F. Bossuyt, F. Axisa; заявл. 29.01.10; опубл. 05.08.10. — 61 p.
4. Hocheng H., Chen C. Design, Fabrication and Failure Analysis of Stretchable Electrical Routings // *Sensors*, 2014. Vol. 14. P. 11855–11877.
5. Jablonski M., Lucchini R., Bossuyt F. et al. Impact of geometry on stretchable meandered interconnect uniaxial tensile extension fatigue reliability // *Microelectronics Reliability*, 2014. Vol. 55. P. 143–154.

УДК 544.6.076

Применение электрохимических преобразователей

Дудкин П. В.^{1,2}, к. ф.-м. н. Криштоп В. Г.^{1,2,3}

¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгорудный, Институтский пер., 9*

² *ООО «Сейсмотроника»
111020, г. Москва, Юрьевский пер., 11*

³ *Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
dudkin.pv@mipt.ru*

Рассматриваются применения датчиков на основе электрохимических преобразователей (ЭХП) в приборах и системах различного назначения, появление новых возможностей от дополнения существующих систем датчиками ЭХП, обсуждаются преимущества использования ЭХП.

Ключевые слова: сенсоры; электрохимические микросистемы; планарный электрохимический преобразователь; передаточная функция.

В статье кратко изложены принципы работы электрохимических преобразователей (ЭХП). Даны справочные сведения о микроэлектронной технологии ЭХП и о принципах построения датчиков на ЭХП [2, 3].

Подробно рассматриваются приборы различного назначения на основе ЭХП, существующие системы с использованием приборов ЭХП и технические задачи, которые они решают [4–8]:

- сейсмометры и системы сейсмического мониторинга. Исследование вулканической деятельности и предсказание землетрясений;
- геофоны и наземная активная сейсморазведка;
- гидрофоны и морская сейсморазведка; донные и буксируемые косы, охрана фарватера;
- мониторинг колебаний небоскребов и сложных технических сооружений;
- датчики угловой скорости для систем инерциальной навигации;
- инерциальный геокомпас, определение направления на геометрический север.

Литература

1. Krishtop V. G. et al. Technology and application of electrochemical motion sensors // *Advanced Materials Proceedings*, 2019. Vol. 4. № 1. P. 3–9.
2. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Сафонов М. В. Измерительные устройства на основе молекулярно-электронного переноса в микро- и наноструктурах // *Нано- и микросистемная техника*, 2010. — № 6 (119). — С. 47–53.
3. Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Исследование АЧХ молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией // *Микросистемная техника*, 2004. — № 9. — С. 40–45.
4. Shabalina A. S., Krishtop V. G. The precision seismometer based on planar electrochemical transducer // *Proc. SPIE 10224, ICMNE-2016, 102241K*.

5. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Егоров И. В. Сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса в твердотельных и жидкостных микроструктурах // Приборы и системы разведочной геофизики, 2013. — Т. 43. — № 1. — С. 39–49.
6. Капустян Н. К. и др. Сейсмометрическое сопровождение строительства и эксплуатации высотных зданий // Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и Московской области. Ред. А. А. Маловичко. — Обнинск, 2012. — С. 36–44.
7. Krishtop T. V. et al. High-sensitive ultra-low frequency hydrophone // Proc. SPIE 11022, ICMNE-2018, 1102210.
8. Zaitsev D., Antonov A., Krishtop V. Angular MET sensor for precise azimuth determination // Proc. SPIE 10224, ICMNE-2016, 102241H.

УДК 621.382.323

Микросистема анализа ферментативной активности для неонатального скрининга

Шешиль А. К., Панова О. С., Комарова Н. В., Грудцов В. П., Рязанцев Д. В., Кузнецов А. Е.

*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11
panovaolya691@yandex.ru*

В работе рассмотрены ионно-чувствительные полевые транзисторы в качестве высокоэффективных микросенсоров для определения каталитической активности фермента альфа-галактозидазы А, низкие значения которой ведут к проявлению болезни Фабри.

Ключевые слова: болезнь Фабри; ISFET; гетерогенная интеграция; биосенсор; α -галактозидаза А.

Болезнь Фабри — это врожденное заболевание, связанное с дефицитом активности фермента альфа-галактозидазы А (α -GAL A) [1]. Актуальной задачей является разработка инструментов быстрой диагностики данного заболевания среди новорожденных детей с перспективой включения в программу неонатального скрининга.

В этой работе для определения активности α -GAL A были разработаны ионно-чувствительные полевые транзисторы с плавающим затвором на основе оксида гафния. Заготовки структур были изготовлены на коммерческой КМОП-фабрике, а итоговые чувствительные элементы сформированы в цикле дополнительных групповых обработок пластин. Чувствительная поверхность на основе 35-нм пленки оксида гафния была сформирована методом низкотемпературного атомно-слоевого осаждения. Допороговый наклон полупроводниковых структур составил $76,3 \pm 1,2$ мВ на декаду тока. Разработанные сенсоры обладают рН чувствительностью 56 мВ/рН, близкой к теоретическому максимуму [2], и демонстрируют линейную зависимость ($R^2 = 0,9995$) в диапазоне рН от 3 до 7,4. Результаты экспериментов показали, что реакция, катализируемая α -GAL A, лучше всего детектируется в 20-мМ цитрат-фосфатном буферном растворе при рН 4.5. Показано, что разработанные структуры могут быть использованы для определения активности α -GAL A не только с помощью дорогостоящего флуоресцентного субстрата, но и с использованием природного сахара рафинозы, что значительно снижает стоимость анализа.

9. Разработанные рН-биосенсоры могут быть использованы для анализа активности α -GAL A с перспективой создания микросистемы для диагностики болезни Фабри у новорожденных.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10187,
<https://rscf.ru/project/22-79-10187/>*

Литература

1. Eng C. M. et al. Nature and frequency of mutations in the alpha-galactosidase A gene that cause Fabry disease // American journal of human genetics, 1993. Vol. 53. № 6. P. 1186.
2. Matsuo T., Esashi M. Methods of ISFET fabrication // Sensors and Actuators, 1981. Vol. 1. P. 77–96.

УДК 621.382.323

Биосенсорная система для определения кардиомаркера тропонина I на основе ион-чувствительного полевого транзистора и аптамеров

Шешиль А. К., Панова О. С., Титов А. А., Грудцов В. П., Рязанцев Д. В., Комарова Н. В.

НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

andrey_sheshil@mail.ru

В работе представлен процесс разработки аптасенсора для определения тропонина I. В качестве преобразователя сигнала биосенсора использовались ион-чувствительные полевые транзисторы, изготовленные в составе интегрального кристалла со встроенной схемой обработки сигнала. В качестве рецепторного слоя биосенсора использовали ДНК-аптамер к тропонину I. Полученный аптасенсор демонстрировал избирательный отклик на тропонин I.

Ключевые слова: ISFET; КМОП; аптасенсор; биосенсор; кардиомаркер; тропонин I.

Тропонин I является самым достоверным маркером инфаркта миокарда, а разработка и совершенствование биосенсоров для его определения представляют собой актуальную задачу биоаналитической химии [1]. В рамках данной работы выполняется разработка биосенсора для определения тропонина I на основе ион-чувствительного полевого транзистора (ISFET) в комбинации с ДНК-аптамером.

ISFET с КМОП-схемами считывания сигнала были изготовлены по 1,2-мкм 5В КМОП-процессу. Все схемы были интегрированы в тестовую микросхему размером 7×7 мм. Схемы считывания сигнала с аптасенсоров были разработаны на основе дифференциального считывания сигналов с двух соседних ISFET, имеющих схожие характеристики. Один ISFET был функционализирован ДНК-аптамером к тропонину I, а второй ISFET выполнял функцию референса, для чего на ней была иммобилизована одноцепочечная ДНК, не обладающая способностью специфически связываться с тропонином I. Для отслеживания сигнала ISFET измеряли изменение выходного напряжения во времени. Считывание сигнала с обеих схем выполняли параллельно. Отслеживали изменение сигнала обеих площадок при добавлении раствора тропонина I в реакционную камеру. При добавлении аналита наблюдался отклик только той площадки, поверхность которой была модифицирована аптамером к тропонину I. Наличие специфического отклика на целевое соединение создает основу для дальнейшей характеристики разрабатываемого биосенсора на тропонин I. Преимуществом разрабатываемого устройства является более высокая чувствительность микросистемы за счет компенсации шумов и дрейфа базовой линии при использовании дифференциальной схемы измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10175, <https://rscf.ru/project/21-79-10175>

Литература

1. Komarova N. et al. Aptamers targeting cardiac biomarkers as an analytical tool for the diagnostics of cardiovascular diseases: A review // *Biomedicines*, 2022. Vol. 10. № 5. P. 1085.



УДК 47.13.11

Ключевые особенности технологического оборудования GaN-изделий

Маркин А. В., Полушкин Е. А., Баранов Г. В., к. ф.-м. н., Дорофеев А. А.
АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В работе рассмотрена технология изготовления GaN-изделий, максимально адаптированная к стандартным процессам кремниевого микроэлектронного производства. Указаны некоторые особенности технологического оборудования, необходимые для реализации процессов формирования GaN-изделий.

Ключевые слова: технология GaN; HEMT; GaN-on-Si.

Устройства на основе GaN-гетероструктур обладают более высокими функциональными характеристиками (рабочие токи, высокий КПД, радиационная стойкость, габариты и т. д.) по сравнению с кремниевыми аналогами, однако они сильно уступают им в себестоимости. При производстве силовой GaN ЭКБ переход на большие диаметры пластин (200 мм) и использование высокопроизводительной технологической базы стандартных кремниевых фабрик позволяют решить проблемы массового производства и снижения себестоимости изделий. Для производства GaN ЭКБ на существующих кремниевых фабриках необходима взаимная адаптация GaN-технологии и линейки стандартного технологического оборудования кремниевого производства [1, 2]. Наиболее широко распространенная технология СВЧ ЭКБ на GaN-гетероструктурах использует технологические процессы взрывной литографии lift-off и металлизацию на основе золота, что принципиально отличается от стандартной кремниевой технологии, но технология изготовления силовой ЭКБ на GaN-гетероструктурах может быть интегрирована в кремниевую технологию без использования взрывной литографии и золотой металлизации [3, 4]. Однако для производства GaN-изделий требуется некоторое дополнительное оборудование, реализующее процессы, отсутствующие в кремниевой технологии.

Ниже представлены технологические процессы, отсутствующие в кремниевой технологии, и дано краткое описание ключевых требований к ним.

Эпитаксия

Качество и свойства эпитаксиальной AlGaIn/GaN-гетероструктуры во многом определяют характеристики прибора, созданного на ее основе. Наибольшее распространение получил метод эпитаксии путем осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD) и метод молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE). MOCVD-метод является более производительным и дешевым, позволяет получать эпитаксиальные структуры на кремниевых подложках диаметром 200 мм, удовлетворяющих требованиям производства GaN ЭКБ.

Прецизионное и/или атомно-слоевое травление GaN-гетероструктур

Для формирования нормально-закрытого транзистора требуется применение прецизионного плазмохимического травления до слоя AlGaIn-гетероструктуры pGaIn/AlGaIn/GaN. Этот процесс реализует атомно-слоевое травление (циклический процесс, убирающий один атомарный слой за цикл) [5, 6] или процесс

селективного травления рGaN-слоя до AlGaIn [5] (селективность достигается из-за добавки в газовую смесь F, образующего нелетучие соединения с Al).

Пассивация GaN-гетероструктур

Процессы, формирующие пассивирующее покрытие на AlGaIn-слое, требуют особого внимания, так как плотность поверхностных состояний, образованных на границе диэлектрик/AlGaIn, сильно влияет на характеристики транзистора. Как правило, в GaN-технологии используется SiNx в качестве диэлектрика. Процесс его осаждения должен исключить увеличение поверхностных дефектов, загрязнений и высокотемпературных воздействий. Для осаждения предпочтительно использовать PECVD-процессы, в случае ICP-CVD в момент «поджига» плазмы происходит кратковременное воздействие на поверхность высокоэнергетическими ионами, что приводит к деградации 2DEG. Также процесс должен обеспечить возможность вариации и контроля механических напряжений в осаждаемых слоях.

Быстрый фотонный отжиг

Формирование омических контактов — ключевой процесс, требующий тщательного контроля состава и толщин осаждаемых металлических слоев, их травления, а также процесса отжига этих структур. Если современные PVD-процессы кремниевой технологии могут обеспечить формирование слоистых металлических структур в одном вакуумном цикле, то их отжиг требует оборудования, позволяющего проводить быстрые хорошо контролируемые однородные термические процессы в инертной среде. Для выравнивания теплового градиента необходимо использовать графитовую оснастку.

Литература

1. URL: <https://www.eetimes.eu/8-inch-gan-on-si-wafers-manufacturing-technology>. (дата обращения: 07.07.2023).
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5. EDN JXZUBV.
3. Garbe V., Weise J., Münchgesang W. et al. Au-free ohmic Ti/Al/TiN contacts to UID n-GaN fabricated by sputter deposition // Journal of Applied Physics, 2017. Vol. 121. № 6. P. 065703. DOI: 10.1063/1.4975485. EDN YXSMKR.
4. Sun R., Liang Y. C., Yeo Y. C., Zhao C. Au-Free AlGaIn/GaN MIS-HEMTs with Embedded Current Sensing Structure for Power Switching Applications // IEEE Transactions on Electron Devices, 2017. Vol. 64. № 8. P. 3515–3518. DOI: 10.1109/TED.2017.2717934. EDN YGIXWP.
5. URL: <https://plasma.oxinst.com/technology/atomic-layer-etching> (дата обращения: 07.07.2023).
6. URL: http://samco-ucp.com/tech/processes/gan_etch_led.php (дата обращения: 07.07.2023).



УДК 621.315.592

Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5 — переход от R&D к производственно-ориентированному уровню

Алексеев А. Н., Новиков С. А., Марасин О. Д., Петров С. И.

АО «НТО»

194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27

petrov@semiteq.ru

Представлены результаты перспективных разработок эпитаксиального и планарного оборудования для СВЧ-микроэлектроники, оптоэлектроники и радиофотоники на основе материалов A^3B^5 . Показан текущий уровень разработок макетов ключевых узлов и производства опытных образцов оборудования МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксии с групповой загрузкой пластин для выращивания широкого спектра приборных гетероструктур. Сформирован и описан облик перспективного производственно-ориентированного планарного оборудования для проведения плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого и магнетронного напыления. Рассмотрены вопросы проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов оборудования.

Ключевые слова: эпитаксия; A^3B^5 ; МЛЭ; МОГФЭ; плазмохимия; электронно-лучевое напыление.

АО «НТО» более 20 лет специализируется на разработке и производстве высокотехнологичного сверхвысоковакуумного и высоковакуумного оборудования для проведения комплекса ключевых технологических операций при изготовлении ЭКБ для микроэлектроники, являясь при этом единственным российским разработчиком и производителем установок молекулярно-лучевой эпитаксии на основе материалов A^3B^5 . В настоящее время АО «НТО» серийно выпускает установки МЛЭ для работы с подложками диаметром до 100 мм, а также ряд установок плазмохимии, физического осаждения и термического отжига для обработки подложек диаметром 100–200 мм, в которых используются собственные ключевые технические решения, в том числе целый ряд запатентованных ноу-хау. Технические характеристики выпускаемого оборудования находятся на уровне лучших мировых аналогов, а по части параметров превосходят их. Всего на сегодняшний день АО «НТО» произведена поставка более 100 различных установок, в частности более 20 установок МЛЭ и комплектирующих к ним, в т. ч. зарубежным заказчикам (Индия, Канада, Сингапур, Республика Беларусь и др.).

На российском рынке сегодня существует потребность в установках МЛЭ для выращивания эпитаксиальных гетероструктур на основе материалов A^3B на подложках диаметром 100–150 мм с роботизированной загрузкой. Данные установки должны обеспечить стабильность ростовых параметров, которая критически важна для целого ряда перспективных приборов оптоэлектроники и микроэлектроники. Среди них VCSEL (вертикально-излучающие полупроводниковые лазеры), QCL (квантово-каскадные лазеры), однофотонные излучатели для квантовых компьютеров на основе гетероструктур с квантовыми точками, QWIP-матрицы

(инфракрасные фотоприемники на квантовых ямах), мощные и маломощные СВЧ-транзисторы на основе GaAs и GaN и др.

Кроме того, для решения ряда задач необходимы установки МОС-гидридной эпитаксии с групповой загрузкой пластин. Помимо этого, существует необходимость разработки установок плазмохимии и физического осаждения, близких функциональных аналогов зарубежного оборудования для реализации уже используемых технологических маршрутов для производства ЭКБ на ключевых российских предприятиях. В частности, требуется разработка установок плазмохимии с цилиндрическим источником индуктивно-связанной плазмы, а также источников электронно-лучевого напыления российского производства.

В докладе представлены результаты разработки эпитаксиального оборудования, а также концепция производственно-ориентированного оборудования для планарного процессинга. Рассматриваются вопросы проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов оборудования. Данная разработка обеспечит российских разработчиков и производителей полупроводниковых приборов средствами производства мирового уровня. Продемонстрированы результаты использования серийно выпускаемого отечественного оборудования в производственных циклах АО «Светлана-Рост» и ряда других отечественных предприятий — производителей ЭКБ.



УДК 533.59:546.128:621.382

Разработка и внедрение линейки перспективного оборудования для КМОП- и GaN-технологий

Костюков Д. А., Шубников А. В., Щуренкова С. А.

АО «НИИТМ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10

dkostyukov@niitm.ru

Разработана и внедрена в производство линейка перспективного оборудования для КМОП- и GaN-технологий, включающая модули плазмохимического травления полупроводниковых, металлических, диэлектрических и фоторезистивных слоев, модули химического осаждения из газовой фазы пленок SiO_2 и Si_3N_4 , в т. ч. со стимулирующей плазмой, и установку газофазной МОС-эпитаксии слоев GaN на Si.

Ключевые слова: технологическое оборудование; плазмохимическое травление; термо- и плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы; газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений.

Необходимость обеспечения безопасности, суверенитета и технико-экономического развития России требует организации отечественного производства основных изделий микроэлектроники. К ним относятся интегральные микросхемы (ИМС) логики и памяти на основе КМОП-технологии и высоковольтные и СВЧ-приборы на GaN-технологии. Такое производство невозможно без решения важной государственной научно-промышленной задачи — разработки и изготовления отечественного серийного технологического оборудования микроэлектроники. Планы создания такого оборудования и сопутствующих производств на его основе сформулированы в государственной программе Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы» и государственной «Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» [1].

АО «НИИТМ» продолжает развитие по двум стратегическим направлениям: совершенствование производимого специального технологического оборудования и расширение его номенклатуры. По первому направлению разработаны и внедрены в производство технологические модули плазмохимического травления и химического осаждения из газовой фазы для формирования КМОП ИМС с минимальными размерами до 65 нм на пластинах диаметром до 300 мм. Реализация субстананометрового уровня технологии обеспечивается за счет использования плазмы высокой плотности; двух разночастотных генераторов, позволяющих независимо управлять концентрацией и энергией заряженных частиц; подложкодержателей с электростатическим прижимом, обеспечивающих увеличение полезной площади и стабильности температуры обрабатываемых пластин; климатических мини-кабин (Equipment Front End Module — EFEM) с высоким классом чистоты, производящих автоматическую загрузку-выгрузку пластин в СМИФ (Standard Mechanical InterFace — SMIF) или ФОУП (FOUP — Front Opening Unified Pod) контейнерах; оригинальных по конструкции и материалам систем подачи рабочих газов в реакционные камеры. Причем указанные технологические модули могут работать как в виде отдельных установок, так и в составе кластерного оборудования,

которое с помощью выбора видов, расположения и количества модулей может быть легко адаптировано к нужному технологическому маршруту производства ИМС с требуемой производительностью [2].

Объем мирового рынка продаж высоковольтных приборов и систем СВЧ электроники на основе GaN-технологии достиг к 2020 году 40 млрд долларов [3]. Основной операцией, позволяющей совместить преимущества КПОП- и GaN-технологий, является выращивание эпитаксиальных слоев GaN на Si. Поэтому по второму направлению развития АО «НИИТМ» разработало и внедрило установку газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений слоев GaN на Si. Указанная установка позволяет проводить поштучную обработку подложек диаметром 150 и 200 мм, а также групповую обработку подложек диаметром 50, 76 и 100 мм. При этом достигается скорость роста слоев GaN до 30 мкм/час с неравномерностью по пластине до $\pm 1,2\%$. Также в установке можно производить легирование атомами Fe и C растущих слоев GaN и осаждение на выращенные слои GaN пассивирующих пленок нитрида кремния. Кроме того, в установке предусмотрен контроль толщины слоев GaN и прогиба структуры в процессе роста. Система управления и контроля установки разработана на основе отечественного программного обеспечения, а сама установка имеет годовой ресурс до 2000 эпитаксиальных процессов.

Литература

1. Бирюков М. Г., Киреев В. Ю., Ковалев А. А., Певчих К. Э. Микроэлектроника России: Проблемы разработки и производства технологического оборудования // Перспективные технологии для систем безопасности, 2023. — № 1. — С. 10–31.
2. Официальный сайт АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» (АО «НИИТМ») — www.niitm.ru.
3. Дедкова А. А., Киреев В. Ю., Митько С. В., Никифоров М. О. Исследования островковых пленок нитрида галлия на сапфировых подложках методами растровой электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии // Российские нанотехнологии, 2019. — Т. 14. — № 3–4. — С. 93–100.



УДК 621.793.162; 621.315.592

Разработка установки МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия на подложках диаметром до 200 мм для производства силовых транзисторов

Бирюков М. Г.¹, Афонин П. Е.¹, Щуренкова С. А.¹, Пугачев Д. Ю.¹,
Заварин Е. Е.², Сахаров А. В.², Цацульников А. Ф.², Базаревский Д. С.³,
Стаценко В. Н.⁴, Федотов С. Д.⁴

¹ АО «НИИТМ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
drugachev@niit.ru

² НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ ООО «СОФТ-ИМПАКТ»

194044, г. Санкт-Петербург, Сампсониевский пр., 64

⁴ АО «Эпиэл»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2

Представлены ключевые характеристики разработанной установки для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия на подложках диаметром до 200 мм для производства силовых транзисторов. Показаны результаты реализованных базовых технологических процессов.

Ключевые слова: установка МОС-гидридной эпитаксии; гетероструктура; нитрид галлия; базовый технологический процесс.

Введение

Наиболее перспективным направлением микроэлектроники является создание полупроводников на основе III-N-гетероструктур GaN, так как они лучше всего отвечают постоянно возрастающим требованиям к техническим характеристикам конечных изделий, таких как СВЧ- и силовые транзисторы [1]. В настоящее время основным промышленным методом изготовления III-N-гетероструктур является МОС-гидридная эпитаксия [2]. Поэтому вопрос создания отечественных установок современного технического уровня для производства таких изделий становится все более актуальным.

Характеристики установки и результаты реализации базовых технологических процессов

Ключевыми характеристиками и особенностями разработанной установки являются:

- количество одновременно обрабатываемых подложек (Si, Al₂O₃, SiC) 1×200, 1×150, 3×100, 7×76,2, 13×50,8 мм;
- контроль толщины и прогиба структуры во время роста (*in situ*);
- осаждение высокоомных буферных слоев GaN, легированных Fe и С;
- осаждение пассивирующего Si₃N₄-покрытия непосредственно в эпитаксиальном реакторе;
- производительность (GaN на Si) до 2000 эпитаксиальных процессов в год.

В ходе реализации проекта были разработаны базовые технологические процессы (БТП) и получены следующие результаты, табл. 1.

Таблица 1. Параметры эпитаксиальных слоев

БТП	Параметр эпитаксиального слоя на диаметре 200 мм	Измеренное значение
1. Нелегированный GaN	Однородность по толщине по площади структуры	2,2%
	Ширина кривой качания	86 arcsec
2. n-GaN:Si	Однородность по толщине по площади структуры	3,1%
	Максимальный уровень легирования	$6,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
	Подвижность	216 $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$
	Однородность слоевого сопротивления по площади структуры	5,3%
3. Изолирующий GaN:(C, Fe)	Однородность по толщине по площади структуры	1,2% (C) 0,8% (Fe)
	Слоевое сопротивление	$3,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}/\square$
4. AlGaN	Однородность по толщине по площади	1,2%
	Содержание Al	4, 7, 17, 25, 44, 69, 100%
	Однородность по составу по площади структуры	2,0%
	Скорость роста AlGaN с содержанием Al = 15%	5,36 мкм/час
5. Диэлектрик Si ₃ N ₄	Однородность по толщине по площади	1,1%

Заключение

Разработанная установка МОС-гидридной эпитаксии с оптимизированным малогабаритным реактором, малой продолжительностью эпитаксиального процесса и значительно более низкой по сравнению с зарубежными аналогами ценой является предпочтительным инструментом для создания новых технологий, проведения НИОКР и организации опытных производств.

Литература

1. Бондарь Д. Нитрид галлия — премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники // Компоненты и технологии, 2018. — № 4. — С. 134–137.
2. Лундин В. В., Заварин Е. Е., Сахаров А. Ф., Цацульников А. Ф., Устинов В. М. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.



УДК 537.2

Применение электростатического прижима в микроэлектронике

Черкунов В. И., Ширяев М. Е., Челапкин Д. Г., Бабич А. В.

АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Георгиевский, 5, стр. 1

v.cherkunov@estika.ru

В работе представлен обзор существующих устройств с электростатическим прижимом, их классификация применительно к каждому типу оборудования для определенного технологического процесса. Даны рекомендации по выбору и использованию определенных типов устройств под конкретные задачи.

Ключевые слова: электростатический прижим; микроэлектроника; пластина; усилие прижима.

Современное машиностроение для микроэлектроники в Российской Федерации практически не использует столов с электростатическим прижимом. Оборудование, производимое на территории Российской Федерации, содержит, как правило, механический прижим и в редких случаях электростатические столы иностранного производства.

Тем временем столы с электростатическим прижимом повсеместно распространены в оборудовании иностранного производства. Преимущества электростатического прижима, очевидно, — это и надежное удержание пластины, и возможность выравнивания прогиба пластины, а также лучшая равномерность прижима и, соответственно, лучшая теплопередача. В связи с этим внедрение столов с электростатическим прижимом в отечественное оборудование для процессов микроэлектроники является актуальной задачей. Однако разработка и изготовление подобных устройств сопряжены со многими технологическими трудностями.

Столы с электростатическим прижимом могут быть использованы для большого спектра процессов микроэлектроники. Принцип работы подобных устройств заключается в том, что для закрепления подложки на держателе используются встроенные электроды, на которые подается высокое напряжение, тем самым прижимая пластину [1]. В частности, электростатический прижим хорошо зарекомендовал себя в литографических процессах, которые требуют большой однородности прижима пластины по всей ее площади, тем самым снижая возможные искажения [2].

Электростатический тип прижима начали применять с середины 1980-х годов [3], однако, как упоминалось ранее, разработка и изготовление подобных устройств сопряжены со многими нетривиальными технологическими задачами, которые до настоящего времени еще полностью не решены, и до сих пор нет единого мнения по поводу наиболее оптимального конструктивного исполнения столов с электростатическим прижимом. Кроме того, вариант конструктивного исполнения зависит также и от того, где планируется в дальнейшем применять стол. К примеру, существуют различные типы классификации данных устройств [4]: по механизму взаимодействия (кулоновская сила, эффект Джонсона—Рабека), по типу конструкции (монополярная, планарная и т. д.), и выбор определенного типа будет зависеть от необходимой задачи.

В связи с вышесказанным оптимизация конструкции до сих пор является актуальной задачей. Это можно заметить по тому, что различные производители технологического оборудования периодически получают патенты на подобные устройства [3]. В данной работе предложены рекомендации по выбору и использованию определенных типов столов с электростатическим прижимом под конкретные задачи.

Таким образом, в работе представлены актуальные технологические решения, применяемые для изготовления столов с электростатическим прижимом.

Литература

1. Кондратьев Е. М. Универсальное электростатическое крепежное устройство // Международный научный журнал «Символ науки», 2015. — № 12. — С. 55–60.
2. Kalkowski G., Risse S., Muller S., Harnisch G. Ultraplanare Elektrostatische Chucks für Next-Generation-Lithographie // Annual Report 2005. Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering Jahresbericht Annual Report, 2005. P. 30–35.
3. Изюмов М. О. Электростатический прижим с температурной стабилизацией полупроводниковых пластин при плазменной обработке // Приборы и техника эксперимента, 2009. — № 6. — С. 131–132.
4. Kim J.-H., Koo Y., Song W., Hong S. J. On-Wafer Temperature Monitoring Sensor for Condition Monitoring of Repaired Electrostatic Chuck // Electronics, 2022. Vol. 11. P. 880.



УДК 621.793.1, 621.794.4, 537.534.2

Разработка электронно-лучевых испарителей, плазменных и ионно-лучевых установок травления в «Эпос-Инжиниринг»

Безруков И. А., Глухов И. М., Кривенко А. С., Шичалин К. В., Шишкин Е. А.
ООО «ЭПОС-Инжиниринг»
630090, г. Новосибирск, ул. Демакова, 27/1
office@epos-nsk.ru

В настоящее время развивается линейка электронно-лучевых испарителей с повышенной мощностью, создается сверхвысоковакуумный ЭЛИ для МЛЭ, а также компактная модель на четыре тигля. Создана высокопроизводительная установка для сухого травления фоторезиста типа SU-8 с высоким аспектным отношением. Настольная установка сухого анизотропного травления имеет два ВЧ-генератора — ИСР и смещение подложкодержателя. Для лабораторной установки ионного травления создан ионный источник типа «Бернас», образцы нагреваются до 900 °С и наклоняются относительно пучка.

Ключевые слова: электронно-лучевой испаритель; сухое травление; плазма; ионный источник.

«ЭПОС-Инжиниринг» специализируется на производстве вакуумного, электро-термического оборудования, разработке новых технологий и процессов. В дополнение к исследовательским установкам, которые успешно работают в России и СНГ, начат выпуск высокопроизводительных установок с возможностью кассетной загрузки, кластерной обработки пластин. Для этого разработан вакуумный робот SCARA с перемещением по трем координатам и S-образным профилем скорости. Наличие вертикального перемещения существенно для загрузки пластин в установках с напылением снизу вверх.

Серийно выпускаются одно- и шеститигельные электронно-лучевые испарители. Весь комплект ЭЛИ российского производства, включая вводы, блоки питания и управления лучом. Вращение ячейки с тиглями для выбора необходимого материала может выполняться как через привод, расположенный строго под ЭЛИ, так и сбоку из любой точки вакуумной камеры с использованием гибкого привода. В настоящее время разрабатывается ЭЛИ с повышенной мощностью, с током эмиссии до 1,25 А, варианты сверхвысоковакуумного ЭЛИ для МЛЭ, а также компактная модель на четыре тигля.

Разработанная высокопроизводительная установка для сухого травления фоторезиста типа SU-8 может применяться для формирования полимерных микро-структур с высоким аспектным соотношением, при изготовлении микрофлюидных чипов для исследования единичных живых клеток *in vitro*, микрогальванопластики и формовки (LIGA-технология) для микроструктурных фильтров субтерагерцевого диапазона. Плазменный волноводный СВЧ-генератор (WR340) с кварцевой разрядной трубкой на волне H_{10} удален максимально вверх от вращающегося стола, вмещающего три подложки $\Phi 100$ мм. Для расширения диапазона условий обработки стол охлаждается водой или регулируемо нагревается до 250 °С. Установка содержит четыре независимых газовых канала, турбомолекулярный и спиральный насосы.

Настольная установка сухого анизотропного травления имеет два ВЧ-генератора — ИСР-антенну (500 Вт) и смещение подложкодержателя (300 Вт), охлаждаемый столик с регулировкой высоты, два газовых канала. Реализовано исполнение как со стеклянной, так и с алюминиевой камерой. В установку легко загружается одна подложка $\Phi 100$ мм.

Для лабораторной установки ионного травления создан ионный источник типа «Бернас». Ионные источники такого типа характеризуются высокой долговременной стабильностью, активно применяются в современных имплантерах. Обрабатываемые образцы диаметром до 20 мм нагреваются до 900 °С и наклоняются относительно пучка на угол 45–90 градусов. Установка компактная, настольного исполнения, может применяться для получения образцов для исследования поверхностного рельефа.

Литература

1. Boyko E. V., Kostogrud I. A., Bezrukov I. A., Krivenko A. S. and Smovzh D. V. (2019). The influence of the crystallographic orientation of the copper catalytic substrate crystallites on the mechanical transfer of graphene // *Materials Research Express*, 6 (12), [125628], doi.org/10.1088/2053-1591/ab6537.



УДК 66.041-982

Применение печей вакуумной пайки для ответственных компонентов

Зюбер Д. И.¹, Шаталин А. С.²¹ООО «САВТЭК»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4, стр. 5 ком. 50

info@savtech.ru

²АО «НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, 27

Рассмотрены теоретические основы процесса вакуумной пайки, преимущества пайки с флюсами и в их отсутствие. Проведено сравнение оборудования с различным типом нагрева и охлаждения рабочей зоны. Исследовано влияние применения данного оборудования на качество паяных соединений.

Ключевые слова: вакуумная пайка; печь для пайки; флюс; формир-газ; пайка в парах муравьиной кислоты; высокий вакуум; кондуктивный нагрев; радиационный нагрев; технологический процесс пайки; пайка с избыточной атмосферой.

Введение

При изготовлении радиоэлектронной продукции одним из самых сложных технологических процессов является пайка. Важно не только построить оптимальный температурный профиль, но и свести к минимуму риски возникновения дефектов.

Для минимизации дефектов проводят предварительную очистку поверхности с применением флюсов — неметаллических веществ, которые разрушают и удаляют окисные пленки и предохраняют очищенную поверхность, пока припой не растечется по ней.

Пайка в газовых средах

В полупроводниковом производстве применение флюсов часто недопустимо, так как иногда они являются причиной выхода из строя приборов [1]. Тогда используют различные технологические газовые среды и вакуум. По характеру воздействия на металл газовые среды делятся на нейтральные и восстановительные. Основной восстановительной средой для пайки в полупроводниковом приборостроении является водород — сухой, очищенный от примесей. Во время пайки он интенсивно поглощается металлом, вытесняя другие газы, и легко удаляется сам.

Технологический процесс вакуумной пайки [2]

Стандартный процесс вакуумной пайки состоит из следующих этапов.

1. Вакуумирование объема камеры.
2. Напуск инертной атмосферы или смеси инертного газа с водородом или парами муравьиной кислоты.
3. Нагрев сборки до температуры активации поверхности.
4. Активация поверхности — разрушение связей между атомами поверхности [3].
5. Нагрев до температуры пайки (пиковой температуры, выше температуры ликвидуса припоя примерно на 10–20 °С).
6. Вакуумирование до давления порядка 10 Па.

7. Выдержка при температуре пайки (от десятка секунд до нескольких минут).
8. Фаза охлаждения.
9. Напуск азота.

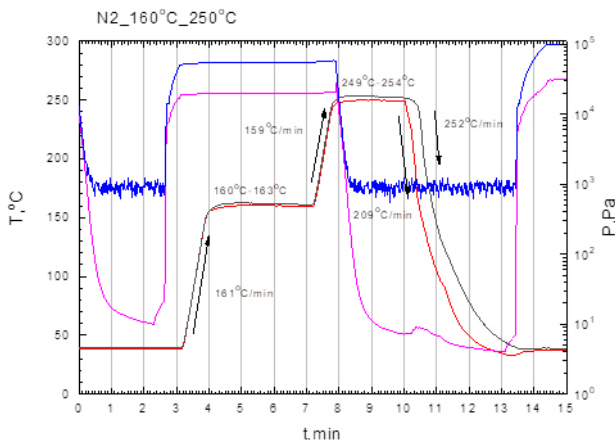


Рис. 1. Технологический процесс вакуумной пайки

Оборудование для вакуумной пайки

Наиболее универсальны печи с кондуктивным нагревом и охлаждением, поскольку температура изделий на них может поддерживаться наиболее точно, а скорость нагрева и охлаждения паяемых сборок мало зависит от их массы. Достижимые скорости нагрева изделий — 3°C/сек, а максимальные скорости охлаждения — 4°C/сек.

В то же время прямой нагрев оптимально применять для пайки электронных сборок с маленькой поверхностью контакта между поверхностью стола и паяемого изделия, а также для маленьких плат с небольшой теплоемкостью. Нужно принимать во внимание, что скорости нагрева, достигаемые в установках с радиационным нагревом, также достигают 2,5–3°C/сек, но намного сильнее зависят от массы и теплоемкости изделий.

Только установки с радиационным типом нагрева обеспечивают возможность проведения пайки при высоком вакууме 10⁻²–10⁻³ Па для эффективного удаления газовых пузырей из паяного соединения.

Заключение

Проведена пайка ряда различных изделий на печи Savtech R250MC и Savtech R200M. Установлено, что при выборе оборудования нужно учитывать требования к термопрофилю для пайки используемым припоем. В целях повышения надежности паяного соединения разумно использовать современное вакуумное оборудование с функциями подачи инертной среды, формир-газа, водорода или паров муравьиной кислоты.

Литература

1. Сычик В. А. Технология сборки интегральных схем. Конспект лекций по дисциплине «Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем». — Минск: БНТ, 2014 — 306 с. — ISBN 978-985-550-140-5.
2. Кантер А. Вакуумная пайка — залог качественного паяного соединения // Технологии в электронной промышленности, 2013 — № 6 — С. 30–33.
3. Перевезенцев Б. Н., Шашкин О. В. Теоретические основы пайки: Электронное учебное пособие. — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет». — 2018. — 132 с. — ISBN 978-5-8259-1271-4.

УДК 004.932.2

Автоматизированные системы управления процессами выращивания монокристалловБородин А. В.^{1,2}, Бородин В. А.^{1,2}, Юдин М. В.^{1,2}, Францев Д. Н.^{1,2}¹ АО «ЭЗАН»

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9

jumv@ezan.ac.ru

² ИФТТ РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2

В работе показано развитие автоматизированных систем управления (АСУ) процессами выращивания монокристаллов методами Степанова, Киропулоса, АСУ для получения методом Чохральского монокристаллов тугоплавких оксидов в контролируемой инертной и окислительной средах, монокристаллов полупроводниковых материалов в водородной атмосфере, монокристаллов кремния, германия и др.

Ключевые слова: выращивание монокристаллов; система управления; автоматизация технологического процесса.

Управляемость и воспроизводимость технологического процесса выращивания монокристаллов полупроводниковых материалов в значительной степени зависят как от уровня автоматизации оборудования для проведения процесса роста, так и от состава системы управления технологическим процессом [1]. АО «ЭЗАН» осуществляет разработку, производство и совершенствование автоматизированного оборудования для выращивания широкого спектра монокристаллов, все установки АО «ЭЗАН» снабжены разработанной нами автоматизированной системой управления (АСУ) процессом роста, которая используется для процессов выращивания монокристаллов сапфира методами Степанова и Киропулоса, для получения методом Чохральского монокристаллов тугоплавких оксидов в инертной и окислительной средах, монокристаллов полупроводниковых материалов группы A^3B^5 в водородной атмосфере, монокристаллов кремния, германия и др. [2].

Разработанная АСУ включает в себя несколько основных модулей в зависимости от типа технологического процесса выращивания монокристалла, а именно:

- модуль автоматического управления процессом кристаллизации по сигналу весового датчика и регулированием по каналу мощности нагрева, который позволяет контролировать скорость роста монокристалла в широком диапазоне значений от 1 до 2500 г/час и обеспечивает поддержание диаметра цилиндрической части выращиваемого методом Чохральского монокристалла с точностью $\pm 2\%$. Управление процессом Чохральского осуществляется с помощью адаптивной системы управления процессом роста с использованием ПИД-регулятора с коэффициентами, автоматически вычисляемыми непосредственно в процессе роста;
- модуль автоматического управления процессом кристаллизации с использованием алгоритма машинного зрения для измерения диаметра монокристалла, выращиваемого методом Чохральского. На основании изображения выращиваемого кристалла, полученного с видеокамеры, разработан алгоритм, позволяющий определить диаметр выращиваемого



монокристалла в диапазоне от 5 до 250 мм с точностью не хуже 0,3 мм на любой стадии роста монокристалла от вытягивания начальной перетяжки до выращивания обратного конуса;

- модуль автоматического затравливания для процесса группового выращивания профилированных кристаллов сапфира способом Степанова, позволяющий реализовать сквозную автоматизацию технологического процесса, включая вакуумирование рабочей камеры, разогрев теплового узла, затравливание, выращивание кристаллов и охлаждение ростовой установки;
- модуль управления подготовкой и дозированием смеси технологических газов в рабочую камеру и контроля состава рабочей среды при выращивании монокристаллов. Реализован алгоритм автоматической подготовки состава рабочей среды, подаваемой в рабочую камеру, алгоритм автоматического поддержания заданного рабочего давления и управления составом газовой среды с использованием газоанализатора, входящего в состав газовой системы ростовой установки;
- модуль контроля отвода и утилизации агрессивных и взрывоопасных газовых сред из рабочей камеры. Система предназначена для контролируемой откачки газовых смесей из рабочей камеры и транспорта их в модуль утилизации или в систему дожига.

В зависимости от специфики технологического процесса выращивания монокристалла ростовые установки, изготавливаемые АО «ЭЗАН», комплектуются АСУ, обеспечивающей максимальную степень автоматизации технологического процесса.

Литература

1. Суздаль В. С., Епифанов Ю. М., Звягигцев Ю. М., Герасимчук Л. И. Развитие систем управления процессами получения крупногабаритных монокристаллов из расплава // РИ, 2001. — № 4. — С. 91–94.
2. Бородин А. В., Бородин В. А., Францев Д. Н., Юдин М. В. Адаптивные автоматизированные системы управления процессами выращивания монокристаллов методами Чохральского, Степанова (EFG) и Киропулоса с использованием датчика веса // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2022. — № 1. — С. 96–101.

УДК 004.932.2

Алгоритм машинного зрения для измерения диаметра монокристалла кремния в процессе его выращивания из расплава методом Чохральского

Францев Д. Н.^{1,2}¹ ИФТТ РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2

² АО «ЭЗАН»

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9

far-far@mail.ru

В докладе представлен разработанный алгоритм обработки видеопотока с камеры, измеряющий диаметр выращиваемого кристалла по изображению с камеры. Приводятся примеры артефактов изображения кристалла и описываются использованные методы борьбы с ними.

Ключевые слова: монокристалл; кремний; метод Чохральского; автоматизация; машинное зрение.

Множество работ [1–5] посвящено способам автоматизации процессов выращивания монокристаллов кремния и германия с использованием оптических методов. Особенностью метода выращивания данных кристаллов является наличие яркого светящегося кольца — мениска расплава, по которому можно определять текущий диаметр кристалла, используя как фотодатчики, так и видеокамеры. Большинство современных систем управления измеряют и контролируют диаметр только на стадии выращивания цилиндрической части кристалла.

В начале данной работы приводятся различные артефакты изображений кристалла, с которыми должен справляться современный алгоритм машинного зрения, такие как «горячие пиксели» камеры, блики на гранях кристалла, стенках тигля и поверхности расплава, неравномерность засветки кадра.

На рис. 1а в качестве примера представлено исходное изображение с камеры, на котором требуется определить диаметр кристалла. На стадии разрачивания кристалла на изображении отсутствует светящееся кольцо мениска. Использование «классического» метода определения границ кристалла по порогу яркости пикселей ошибочно из-за наличия более ярких бликов на конусе кристалла (см. рис. 1б).

В работе проведен анализ изображений с камеры для разных стадий роста: выращивание перетяжки, выращивание прямого конуса, выращивание цилиндра, выращивание обратного конуса. На основе анализа был предложен алгоритм машинного зрения (см. рис. 2), который может измерять диаметр растущего кристалла на любой из перечисленных выше стадий.

В алгоритме для выделения неконтрастных границ используется переключаемый фильтр Собеля [6, 7] (рис. 1в). Для подавления «горячих пикселтов» на изображении используется медианный фильтр [7–9]. Для подавления вариаций диаметра кристалла вследствие его вращения используется временной НЧ-фильтр [10].

Разработанный алгоритм обладает хорошей помехозащищенностью и эффективно подавляет возможные ложные срабатывания при определении диаметра, которые могут быть вызваны артефактами на изображении кристалла.

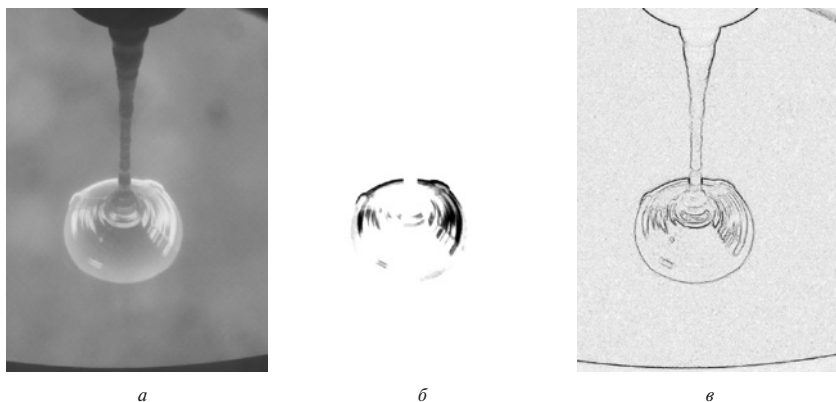


Рис. 1. Изображения кристалла на стадии разращивания (прямого конуса): а) исходное изображение, б) порог по яркости, в) выделение контуров

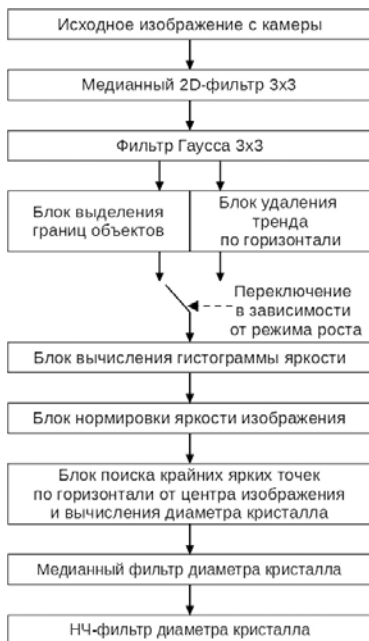


Рис. 2. Схема цифровой обработки изображения для определения диаметра растущего кристалла

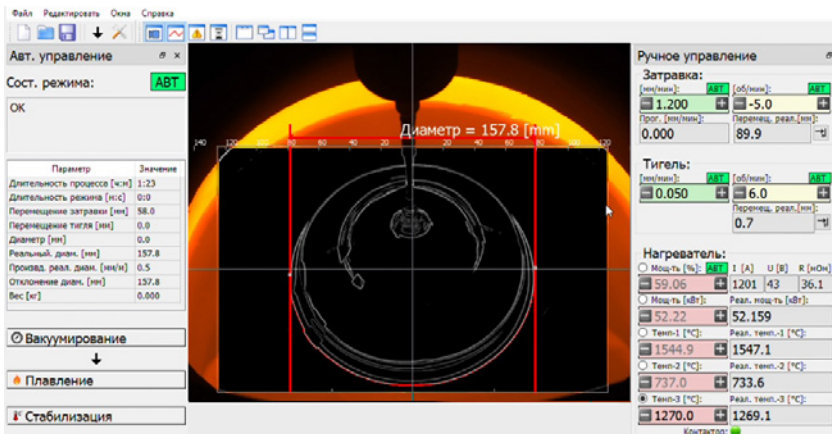


Рис. 3. Интерфейс программы

Алгоритм был внедрен в систему автоматического управления процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов кремния для ростовой установки «Макси-М» производства АО «ЭЗАН» (см. рис. 3).

Проведенные испытания алгоритма в составе системы управления показали возможность измерения диаметра в диапазоне от 5 до 250 мм с точностью не хуже 0,3 мм на любой стадии выращивания кристалла.

Литература

1. Mikhlyayev S. V., Nejevenko E. S. A computer vision system to control the process of crystal growth // Pattern Recognition and Image Analysis, 1999. Vol. 9. № 1. P. 156–158.
2. Багдасаров Х. С. Высокотемпературная кристаллизация из расплава. — М.: Физматлит, 2004. — 160 с.
3. Gartner K. J., Rittinghaus K. F., Seeger A., Uelhoff W. An electronic device including a TV-system for controlling the crystal diameter during Czochralski growth // J. of Cryst. Growth, 1972. — Vol. 13–14. — P. 619–623.
4. Huang L. Y., Lee P. C., Hsieh C. K., Hsu W. C., Lan C. W. On the hot-zone design of Czochralski silicon growth for photovoltaic applications // Ibid, 2004. Vol. 261. № 4. P. 433–443.
5. Михляев С. В. Оптический мониторинг выращивания кристаллов из высокотемпературного расплава методом Чохральского // Материалы электронной техники, 2013. — № 2. — С. 32–39.
6. Engel K. Real-time volume graphics, 2006. P. 112–114.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — 1007 с.
8. Анисимов Б. В. Распознавание и цифровая обработка изображений. — М.: Высш. школа, 1983 — 295 с.
9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2 — 480 с.
10. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. — М.: Недра, 1987. — 221 с.



УДК 621.382

Развитие и использование аппаратно-программной системы («НаноМейкер») для управления процессами литографии и проектирования структур в микронаноэлектронике

Зайцев С. И., Свинцов А. А.

*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
zaitsev@iptm.ru*

Представлены программная и аппаратная части «НаноМейкера», его основные функции и технические характеристики. Показаны преимущества «НаноМейкера» в сравнении с зарубежными аналогами. Приведены примеры использования и указано, что «НаноМейкер» может использоваться в составе иных установок фотолитографии, рентгеновской литографии, ионно-лучевой литографии.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; коррекция эффекта близости; фотолитография; ионно-лучевая литография.

Введение

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) широко используется в научно-исследовательских разработках в области МЭМС-устройств, приборов фотоники и др., а также в производстве фотошаблонов и малосерийных микросхем. В настоящее время остро встает вопрос о развитии отечественных технологий микроэлектроники и, в частности, о развитии ЭЛЛ. В докладе представлена чисто российская разработка.

Основные функции программной части

Аппаратно-программный комплекс «НаноМейкер» состоит из двух частей. Программная часть предназначена для проектирования, подготовки данных для экспонирования разнообразными средствами и моделирования результата экспонирования и проявления резиста.

Аппаратная часть осуществляет процесс экспонирования (согласованное управление траекторией пучка и движением стола) через генератор изображения.

В состав программной части входят подсистемы, обеспечивающие исчерпывающий набор функций:

- проектирование литографических структур (создание иерархических, многоуровневых графических объектов);
- специализированная подготовка (преобразование) графических данных, включая 3D-коррекцию эффекта близости;
- экспорт/импорт данных в форматах других CAD (GDSII, ACAD, ...);
- измерение ошибок электронно-оптической системы микроскопа и компенсация ошибок процесса экспонирования; эта функция позволяет увеличить поле рисования с обычных 300 микрон до нескольких миллиметров;
- измерение и компенсация временных задержек системы развертки пучка, что обеспечивает 10-кратное увеличение производительности литографа по сравнению с зарубежными аналогами;

- (автоматическое) опознавание маркерных знаков и юстировка пластины;
- вырисовывание структур по маркерным знакам;
- цифровой микроскоп для работы в режиме наблюдения;
- моделирование (Монте-Карло) взаимодействия электронов пучка со слоями средами и определение параметров функции близости;
- возможность работы в пакетном режиме (батч-режиме).

Состав и технические характеристики генератора изображений (аппаратной части)

Генератор изображений состоит из двух модулей — аналогового блока и цифровой платы. Цифровая плата устанавливается в PCI-слот компьютера. Аналоговый блок выполнен в виде отдельного модуля и имеет собственный стабилизированный источник питания. Аналоговый и цифровой модули соединяются с помощью оптоволоконного кабеля для осуществления полной гальванической развязки между компьютерной частью и точными аналоговыми схемами.

Для соединения с РЭМ аналоговый блок имеет высокочастотные коаксиальные выходы:

- 1-й — управление X-, Y-сигналами;
- 2-й — переключение бланкера в режимы Blank On/Off;
- 3-й — переключение режима External/Internal (SEM/Lithograph);
- 4-й — высокочастотный коаксиальный вход сигнала видео.

В блоке установлены:

- два 16-разрядных ЦАПа;
- один 8-разрядный АЦП.

Полоса пропускания генератора изображений — 20 МГц.

Минимальное время стояния в точке — 50 нс или менее.

Шаг приращения времени экспонирования — 10 нс или менее.

Время on-Board-накопления изображения — 50 нс или менее.

Сравнение с аналогичными системами

В мире известны две аналогичные системы. В докладе приведено сравнение, которое показывает, что «НаноМейкер» ни в чем не уступает аналогам, в то же время описываются уникальные функции и параметры, составляющие неоспоримое преимущество отечественной системы «НаноМейкер».

Примеры использования

В докладе приведены примеры успешного использования «НаноМейкера» в составе широкого ряда РЭМ (JEOL, ZEISS, TESCAN, HITACHI, THERMOFISHER/FEI и др.).

Очень важно для импортозамещения понимание того, что «НаноМейкер» является интегрирующим агентом, способным выполнять функцию управления другими литографиями. В докладе приводятся примеры создания структур с помощью ионно-лучевой литографии на основе управления установками ФИП. Приводятся примеры использования «НаноМейкера» в проектировании и подготовке данных для прямого рисования лазерным пучком. Предложено использовать «НаноМейкер» для управления установками с динамическими масками (установки бесшаблонной фотолитографии), а также для промышленных электронных литографов с изменяемой формой пучка.



УДК 621.385.83

Разработка перспективного отечественного лабораторного литографа для электронно-лучевой литографии

Князев М. А.¹, Зайцев С. И.¹, Свинцов А. А.¹, Митюхляев В. Б.²¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники**и обособленных материалов РАН**142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6**maleksak@iptm.ru*² *АО «НИЦПВ»**119421, г. Москва, ул. Новаторов, 40/1*

Создан макет отечественного лабораторного литографа для электронно-лучевой литографии на базе растрового электронного микроскопа и аппаратно-программного комплекса NanoMaker.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; наноструктурирование.

Электронно-лучевая литография является ключевым инструментом при создании целого ряда экспериментальных образцов для прикладных и экспериментальных исследований. Она также может быть использована для прототипирования, предсерийного и малосерийного производства конечных изделий.

Начиная с начала 90-х годов для этих целей повсеместно используются лабораторные электронно-лучевые литографы — приборы, построенные на соединении колонн растровых электронных микроскопов с аппаратно-программными комплексами (например ELPHY-PLUS (ФРГ), NPGS (США), XENOS (ФРГ), PROXY (СССР), NanoMaker (РФ) и др.). К настоящему времени таких приборов установлено более полутора тысяч, из них примерно 60 в России. Таким образом, существует необходимость создания отечественного лабораторного электронно-лучевого литографа.

На базе растрового электронного микроскопа (РЭМ) был создан макет электронного литографа, состоящий из:

- растрового электронного микроскопа EVO 50 (фирма Zeiss);
- аппаратно-программного комплекса NanoMaker;
- генератора изображения.

Он предназначен для экспонирования остросфокусированным пучком электронов поверхности функциональных пластин сложных топологий (структур) в колонне электронного микроскопа. Большие структуры разбиваются на поля, и поля экспонируются один за другим за счет перемещения стола. Прибор содержит в составе специализированный графический редактор, процедуры специализированной подготовки данных для последующего экспонирования путем управления пучком с помощью генератора изображений.

Данный прибор обладает следующими основными характеристиками:

- точность позиционирования эл. луча, разрядность АЦП составляет 16 бит;
- скорость развертки луча (АЦП) равна 20 МГц;
- есть редактор для создания 2D- и 3D-структур;
- наличествует моделирование проявления;
- есть функция коррекции эффекта близости при экспонировании.

Приведенные характеристики не хуже, чем у существующих на данный момент зарубежных аналогов.

УДК 533.9.03

Технология сверхиндуктивной резонансной плазмы**Виноградов Г. К.**^{1,2}¹ АО «НПП «ЭСТО»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Георгиевский, 5, стр. 1

² ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

vinogradovgk@mail.ru

Обсуждается новый класс источников плазмы на линиях передачи с внутренним балансом и фазовой компенсацией. Впервые достигнута эффективность передачи энергии в разряд от ВЧ-генератора до 100% при уникальной стабильности разряда и оборудования в передовых полупроводниковых производствах 200 и 300 мм. Обнаружены новые физические явления самоорганизации разряда и возможность непосредственного наблюдения объемных потенциальных и вихревых токов в плазме и их переключения.

Ключевые слова: источники плазмы на линиях передачи; гамма- и лямбда-резонаторы Виноградова.

Введение

Индуктивные генераторы плазмы высокой плотности получили распространение в производственном оборудовании травления и осаждения. Этому способствовал идеал «чисто индуктивной» плазмы, создаваемой вихревыми ВЧ-токами. Такие разряды имеют свои преимущества по отношению к емкостным планарным. Однако размерные эффекты по мере увеличения обрабатываемых пластин до 300–450 мм приводят к увеличению индукторов и, следовательно, к усугублению таких проблем, как емкостные токи от них. Такие потенциальные токи приводят к потере контроля и качества процессов. Это ведет к снижению выхода годных изделий при том, что уровень современных производств давно уже подошел к предельным выходам >97–99%.

Увеличение индукторов приводит к проявлению все более значимых «эффектов линии передачи» на стандартных ВЧ-частотах (13,56 МГц): длина катушки индуктора оказывается уже сопоставима с четвертью длины волны (5,5 м). Неоднородности ВЧ-тока и потенциала вдоль индуктора нарушают однородность ионизации плазмы.

Основными применениями индуктивных источников являются процессы, требующие высокой плотности плазмы. В микроэлектронике такими процессами являются, например, удаление фоторезиста [1] и глубокое травление кремния.

Решение проблем больших индукторов

Разрешить фундаментальную проблему потенциальных токов индукторов и азимутальной однородности в больших реакторах оказалось возможным благодаря использованию волновых свойств самой линии передачи, которые и вызывали проблемы. Нами был предложен новый класс «супериндукционных» источников на линиях передачи [2], в которых проблема неоднородности ВЧ-токов и напряжений больших индукторов была впервые решена путем фазового баланса электрической структуры резонатора.



«Супериндукция» применительно к разряду состоит, во-первых, в том, что реактор практически не выдает емкостных токов на землю, то есть работает как идеальный индуктор-аппликатор (супериндуктор), и, во-вторых, имеет ранее недостижимую энергетическую эффективность (>99,9%) передачи ВЧ-энергии от волнового кабеля в плазму без применения согласующих устройств [3, 4]. Эти и другие новые свойства, в свою очередь, позволили разработать такие источники плазмы для систем удаления фоторезиста, как лямбда- и гамма-резонатор (полноволновой закрытый и полуволновой (открытый) резонаторы Виноградова). Поскольку концепция новых источников плазмы была сразу же после появления запатентована и их реализация состоялась не в лаборатории, а на предприятии в Японии (совместное предприятие Mitsubishi Corp. и Hitachi Kokusai Electric, в настоящее время Kokusai Electric), при том что волновые ВЧ-источники практически никогда в промышленности не применялись, правила их конструирования и свойства не стали известны специалистам до сих пор.

После публикации в США принципов работы новых резонаторных источников плазмы [5] некоторые лаборатории, например в Университете Калифорнии в Беркли [6], закрыли исследования по четвертьволновым резонаторам.

Емкостная проблема индуктивных реакторов стала по существу понятной и получила физическую интерпретацию после того, как эти проблемы были решены и продемонстрированы на примере лямбда-резонатора. Так, была показана эффективность именно фазового, а не амплитудного подхода к решению емкостной проблемы индукторов [2].

В докладе представлены концепции и основы конструирования балансированных резонаторных источников плазмы. Особое внимание уделено перспективам применения в качестве источников радикалов, а также уникальных исследовательских объектов с возможностью наблюдения 3D объемных токов как для исследования физики плазмы, так и для целей обучения методам диагностики и технике плазмы. Весьма любопытно и удивительно, что лямбда-резонатор, являясь по существу большой индуктивной катушкой в экране, позволяет генерировать 100%-й объемной мощности разряд большой мощности (пять-десять киловатт) при отсутствии вихревых индуктивных токов в плазме. Наблюдаются и другие необычные плазменные явления, такие как, например, разделение одного тороидального токового канала в гамма-резонаторе на два близких (параллельных) тороида при повышении мощности выше определенного порога.

Заключение

Супериндукционный реактор, в особенности лямбда-резонатор (Lambda-Resonator), — уникальный объект для изучения физических процессов в плазме и развития фундаментальных и инженерных основ инновационных технологий. Имеется возможность начать в РФ разработку, производство и продажи (с международным лицензированием) подобного оборудования и систем как для академических и образовательных, так и для производственных целей.

Литература

1. Mézerette D. L., Tanimura K., Vinogradov G. K. Analysis of thermally activated kinetics and uniformity of photoresist ashing process on 300 mm wafers // J. Vac. Sci. Technol., 2009. В 27 (5). Р. 2084.

2. Vinogradov G. K. Transmission line balanced inductive plasma sources // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2000. Vol. 9. P. 400–412. Printed in the UK.
3. Vinogradov G. K., Menagarishvili V. M., Yoneyama S. // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998. A 16. P. 1444.
4. Vinogradov G. K., Menagarishvili V. M., Yoneyama S. // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998. A 16. P. 3164.
5. Flamm D. L., Vinogradov G. K., Yoneyama S. Eleventh International Symposium on Plasma Processing // *The Electrochemical Society*, 1996. Pennington, NJ. P. 196–209.
6. Liberman M. A., Liechtenberg A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Second. Ed., Wiley, New York, 2005.



УДК 621.373

Тенденции и перспективы развития лазерного технологического оборудования для микроэлектронных производств

Сапрыкин Д. Л., Тужилин Д. Н.

ООО «Промис Лаб»

(ГК «Лазеры и аппаратура»)

В докладе рассматриваются тенденции и перспективы развития лазерных технологий для микроэлектронных производств, дана классификация лазерных технологий в микроэлектронике и представлена обобщенная модель конструирования систем и разработки технологических процессов.

В вводной части доклада приведены данные о развитии российского и мирового рынка электронного машиностроения, показана тенденция к опережающему внедрению лазерных технологий в электронной промышленности.

Причиной быстрого расширения применений лазерной технологии являются ее уникальные преимущества.

Во-первых, лазерная технология в настоящее время является наиболее универсальной и гибкой. Путем только регулирования параметров излучения можно добиться существенного изменения свойств изделия и даже изменения типа технологического процесса (удаления, сплавления или реструктуризации материала).

Во-вторых, лазерная технология обеспечивает уникальное качество обработки изделий, отличаясь при этом локальностью и селективностью воздействия.

Во многих случаях внедрение лазерных технологий (в частности аддитивных) позволяет заметно сократить число технологических операций и общее время изготовления изделий. Лазерные технологии позволяют избежать износа инструмента и во многих случаях обойтись без специальных оснасток и шаблонов. При сравнении с другими высокоточными технологиями лазерная технология отличается высокой экологичностью. В электронике массовое внедрение лазерных технологий в целом связано с тенденцией к минимизации применения опасных химических веществ, которые не нужны при обработке лазером.

Лазерная машина представляет собой сложную систему, состоящую из ряда подсистем. В докладе представлена обобщенная модель лазерного станка, включающая базовую конструкцию, лазерно-оптическую подсистему, подсистему оптических инструментов, мехатронную (кинематическую) подсистему позиционирования, подсистему контроля технологического процесса, подсистему, обеспечивающую создание рабочей среды, инженерные и вспомогательные блоки.

Лазерное оборудование отличается очень большим числом параметров, которые можно варьировать в целях получения необходимого результата, например создания топологического рисунка, бездефектного разделения или реструктуризации изделия. В рамках представленной модели эти параметры разделены на три группы: 1) параметры технологической машины, 2) параметры технологического процесса и воздействия на обрабатываемый материал, 3) параметры изделия. Показано, что эти три группы параметров могут быть описаны в рамках модели системой функциональных зависимостей, которые могут быть использованы как при выборе

и проектировании параметров технологических машин, так и при планировании технологических экспериментов, а также при использовании технологических машин в ходе производственного процесса и при проведении сервисного обслуживания и модернизации.

Конкретные параметры технологических режимов существенно отличаются для разных материалов с их спектрами поглощения и отражения, фазовыми диаграммами и характеристиками (такими как коэффициент теплопроводности, температура фазовых переходов, теплота плавления и испарения и т. д.).

Используя специальные конструктивные и программные решения, позволяющие обеспечить выбор параметров машины и подбор и контроль технологических режимов, можно в полной мере воспользоваться преимуществами лазерной обработки.

В докладе на основе построенной модели описаны наиболее распространенные типы лазерных технологий, применяющиеся в настоящее время в электронной промышленности (технологии безмасочной лазерной литографии, лазерного разделения приборных пластин на чипы, селективной абляции, сверления и прошивки отверстий, отжига, подгонки, реструктуризации, микросварки и пайки, маркировки и микрорезки).



УДК 004.891

Особенности построения базовых подсистем установки монтажа кристаллов

Зеленский А. А.¹, Алепо А. В.², Харьков М. А.², Абдуллин Т. Х.²¹ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

zelenskyaa@gmail.com

² МГТУ «СТАНКИН»

127055, г. Москва, Вадковский пер., 3а

Рассмотрены принципы разработки ультрапрецизионной высокопроизводительной установки для автоматического монтажа полупроводниковых кристаллов. Описаны детали разработки механических и цифровых компонентов. В цифровую систему включены элементы адаптивного управления на основе технического зрения.

Ключевые слова: монтаж кристаллов; кинематическая схема; адаптивное управление; техническое зрение.

Введение

Монтаж полупроводниковых кристаллов на подложки различных типов является ответственным этапом технологического процесса производства микросхем и отличается высокими требованиями как к точности, так и к производительности операций. Необходимость одновременно высокоточного и динамичного движения инструмента в ходе технологического процесса монтажа потребовала применить ряд решений при разработке установки. Научно-технические решения касаются как механической и приводной части, так и цифровой системы управления [1], которая включает в себя компоненты программируемой автоматики и программного ядра с интегрированными элементами технического зрения и искусственного интеллекта.

Механические и приводные компоненты установки

Учитывая требования к высокой точности и динамике движения инструмента установки, было принято использовать в качестве шасси искусственный гранит на пневматических опорах (рис. 1а). Компьютерное моделирование показало, что необходимо использовать порталную кинематическую схему (рис. 1б), поскольку она обеспечивает заданные динамические и точностные характеристики, а также позволяет получить меньшую амплитуду и длительность механических колебаний при разгоне и замедлении. В качестве приводной части на осях X и Y используются линейные серводвигатели и датчики положения, при этом на оси Z используются два серводвигателя, объединенных по схеме Гантри.

Решение прямой задачи кинематики определяется взаимосвязью неподвижной системы координат (СК) объекта перемещения в точке O и СК инструмента в точке O_{VC} при помощи однородной матрицы преобразования ${}^O T_{VC}$:

$${}^O T_{VC} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 & \sin \theta_c & d_2^* \\ 0 & 1 & 1 & a_1 - L + d_3^* \\ -\sin \theta_c & 0 & \cos \theta_c & a_2 + d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Решение обратной задачи кинематики определяется формулами для определения обобщенных координат:

$$\theta_c^* = \arccos(a_z), \quad d_1^* = p_z - a_2, \quad d_2^* = p_x, \quad d_3^* = p_y + L - a_1.$$

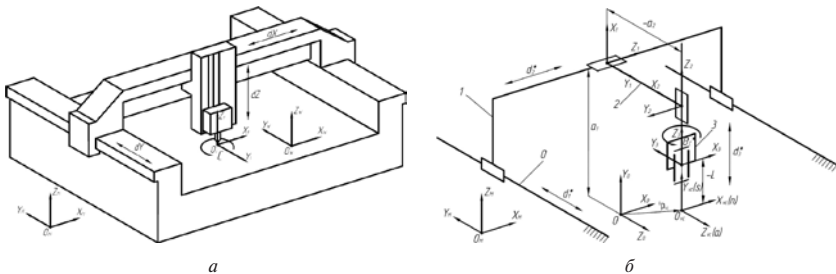


Рис. 1. Внешний вид (а) и кинематическая схема (б) установки монтажа кристаллов

Таблица 1. Представление Денавита—Хартенберга для кинематической схемы установки

Базовая система координат — система координат инструмента					
1	90°	d_1^*	a_1	90°	
2	-90°	d_2^*	$-a_2$	-90°	
3	-90°	d_3^*	0	0°	
Центр инструмента (вакуумного схвата)	θ_c^*	$-L$	0	90°	

Компоненты системы управления установкой

Цифровая система управления включает в себя компоненты программируемой автоматики и программного ядра с интегрированными элементами технического зрения [2] и искусственного интеллекта. В функции системы входят: обнаружение и идентификация кристалла и подложки; определение места установки кристаллов на подложке; перемещение и установка кристалла на подложку. Применение технического зрения и искусственного интеллекта позволяет осуществлять адаптивное управление в процессе монтажа, внося корректирующие воздействия в момент захвата кристалла и его установки на подложку. Основные операции технического зрения включают: захват или получение потока видеоданных; сегментацию изображения на основе модифицированного метода активного контура и интерполяцию сегментированных объектов сплайнами; определение центра массы сегментированного объекта; определение угла поворота анализируемого объекта относительно координат рабочего поля установки на основе преобразования Хаффа; вывод информации.

Элементы искусственного интеллекта используются в процессе обучения и дальнейших операций с пятью типами программных объектов: база данных кристаллов; база данных единичных и множественных ячеек; база данных прикладной задачи.



Заключение

В процессе проектирования оборудования для автоматического монтажа кристаллов были разработаны специализированные механические и цифровые компоненты. В систему включены элементы адаптивного управления на основе технического зрения и искусственного интеллекта. Применение разработанных компонентов и методов позволило достичь высоких характеристик по точности и динамике выполняемых оборудованием технологических операций.

Литература

1. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Илюхин Ю.В., Харьков М.А. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов // «СТИН» (СТанки ИНструмент), 2019. — № 8. — С. 5–8.
2. Voronin V. V. et al. Image inpainting using cubic spline-based edge reconstruction // Image Processing: Algorithms and Systems X; and Parallel Processing for Imaging Applications II. SPIE, 2012. Vol. 8295. P. 123–132.

УДК 621.38

Управляемое формирование острия кантилеверов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков

Коломийцев А. С., Котосонова А. В.*Южный федеральный университет
347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
askolomiytsev@sfedu.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по формированию острия зондов для сканирующей зондовой микроскопии с улучшенными метрологическими параметрами методами локальных ионно-лучевых технологий. Представленная технология позволяет модифицировать острия зондов для АСМ и СБОМ в целях решения конкретных задач исследования материалов.

Ключевые слова: кантилевер; зондовая микроскопия; ближнепольная оптическая микроскопия; фокусированный ионный пучок.

Введение

В настоящее время существенным фактором, сдерживающим развитие и широкое внедрение методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), являются артефакты, возникающие из-за несовершенства формы острия зонда. Это ограничение может быть преодолено за счет использования технологий локальной микрообработки, таких как травление фокусированным ионным пучком (ФИП) и осаждение материалов из газовой фазы фокусированным ионным пучком для формирования и модификации структуры острия зонда. При использовании метода ионно-стимулированного осаждения появляется возможность прецизионного управления формой и геометрическими параметрами острия зонда в широком диапазоне за счет применения наноразмерного ионного пучка [1]. Однако важной проблемой является управление параметрами и траекторией ионного пучка для обеспечения наиболее точного воспроизведения расчетного профиля острия зонда [2]. Ключевую роль в этом процессе играет правильный выбор шаблонов и соотношение их положения и геометрических параметров с технологическими параметрами ФИП.

Формирование острия кантилеверов

В данной работе представлен метод расчета и создания сложных шаблонов для сверхточного формирования острия зондов для сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) методом локального ионно-стимулированного осаждения. Острия зондов СБОМ [3] представляют собой полые конусы с диаметром основания от 5 до 20 мкм, углом наклона острия от 15° до 110° и высотой от 4 до 30 мкм, содержащие входную и выходную апертуру для прохождения оптического сигнала (рис. 1).

Острия зондов формируются методом ионно-стимулированного осаждения углерода с использованием набора взаимосвязанных шаблонов в виде концентрических окружностей заданного диаметра. Порядок экспонирования элементов шаблона и их взаимное расположение определяют итоговые геометрические параметры острия. Для получения структуры заданной формы методом



ионно-стимулированного осаждения необходимо учитывать не только боковое смещение деталей относительно друг друга, но и точное смещение вдоль оси z , так как по мере роста структуры для последующих элементов шаблона ионный луч будет расфокусироваться, что требует динамического смещения фокуса луча. Ключевым параметром процесса является высота осажденной структуры, которая позволяет определить, на какую величину необходимо сместить фокус луча при переходе к следующему элементу. В ходе экспериментальной части работы были исследованы скорости осаждения углерода при различных значениях тока ФИП (Ga^+).

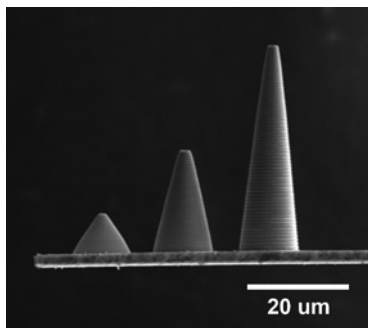


Рис. 1. РЭМ-изображения острия зондов для СБОМ с углами 70° , 30° и 15° , сформированные с использованием ФИП

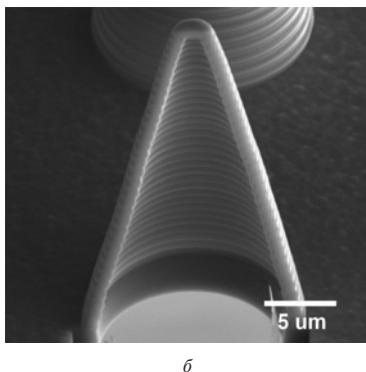
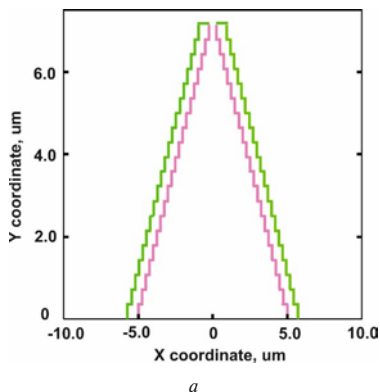


Рис. 2. Расчет количества элементов шаблона и их параметров (а); поперечное сечение острия зонда СБОМ (б), изготовленного по предлагаемому методу

На основе полученных экспериментальных данных была разработана математическая модель для расчета геометрических параметров шаблонов (диаметр и высота кольца, количество колец, смещение колец относительно друг друга) и величины фокусного расстояния для каждого кольца (рис. 2а). На рис. 2б показано поперечное сечение острия зонда СБОМ с углом наклона 30° .

Заключение

Экспериментально было установлено, что при токе ФИП 0,3 нА и энергии 30 кэВ ошибка в воспроизведении размеров острия зонда составила не более 4%. Предложенный метод позволяет разрабатывать шаблоны для высокоточного изготовления сложных 3D-микроструктур методом ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01239 в Южном федеральном университете (разработка технологии трехмерного прототипирования) и гранта Правительства РФ № 075-15-2022-1123 (тестирование точности и применение разработанной технологии для исследования свойств материалов)

Литература

1. Winkler et al. 3D nanoprinting via focused electron beams // J. Appl. Phys., 2019. 125, 210901.
2. Kolomyitsev A. S., Gromov A. L., Il'in O. I. et al. Ultramicroscopy, 2022. 234, 113481.
3. Novotny L. and Hecht B. Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press, Cambridge, 2006.



УДК 628.8

Надежность чистых производственных помещений при эксплуатации

Медведовский М. Д.¹, Маркин А. В.²

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

mmedvedovskiy@niime.ru, almarkin@niime.ru

Главное назначение чистых производственных помещений состоит в создании управляемых условий технологических процессов. Управление процессов описывается циклом PDCA (Plan-Do-Check-Act)/ПДПК (планирование — действие — проверка — корректировка).

Ключевые слова: чистые производственные помещения; детализация; надежность; интеграция.

Введение

В микроэлектронном производстве особое внимание уделяется окружающей среде производственных процессов. Организация производства в помещениях с контролируемыми и управляемыми параметрами микроклимата увеличивает процент выхода годных изделий и повышает качество производимой продукции.

Основным поражающим элементом из окружающей среды для кремниевых пластин являются механические частицы. А основным параметром чистого производственного помещения является класс чистоты N ИСО, присваиваемый в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017 исходя из концентрации аэрозольных частиц. Температура же и относительная влажность оказывают влияние на генерацию и перемещение аэрозольных частиц по чистому производственному помещению.

Реализация предложенных алгоритмов поможет определить степень влияния различных факторов на параметры окружающей производственной среды и предпринять верные корректирующие действия по устранению неблагоприятных факторов.

Основная идея состоит в использовании методики оценки качества оборудования в соответствии со стандартом SEMI E10-0600, применимым к чистым производственным помещениям. Главная цель — детализация выявленных отклонений параметров окружающей среды и принятие корректирующих решений на основе полученных данных. При использовании методики стандарта SEMI E10-0600 для чистых помещений существует ряд допущений, касающихся описания чистого помещения для производственного оборудования. А основным продуктом выбраны параметры окружающей производственной среды. Также на основе рассчитанных коэффициентов определена степень влияния подразделений, задействованных в эксплуатации, на итоговую стабильность параметров окружающей среды чистых производственных помещений. Полученные данные надежности чистых производственных помещений могут быть интегрированы в итоговую надежность изделий.

Алгоритм расчета надежности чистого производственного помещения

Основой для создания алгоритма расчета надежности чистого помещения является описание надежности производственного оборудования в международном стандарте SEMI E10-0600. Из указанного стандарта используется коэффициент K_{uptime} ,

описывающий время готовности оборудования, обусловленное качеством самого оборудования в процентном соотношении (1) с допущением, что чистое помещение является производственным оборудованием. Именно коэффициент K_{uptime} выбран в качестве показателя надежности чистого помещения:

$$K_{uptime} = \frac{t_z}{t_o} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где t_z — время готовности оборудования, t_o — операционное время.

Временем готовности оборудования t_z является весь временной промежуток между двумя крайними протоколами контроля окружающей среды без отклонений. Операционным временем t_o является все время, заранее выбранное для проведения расчетов.

Производительным временем является разница между временем готовности t_z и временем инженерных работ $t_{инж}$ на техническое обслуживание инженерных систем по поддержанию микроклимата. При отсутствии технического обслуживания в выбранном временном интервале $t_{инж}$ приравнивается к нулю.

Дополнительно из стандарта выбран SEMI E10-0600 коэффициент $MTBF_p$, описывающий среднее (производительное) время между отказами в часах (2). $MTBF_p$ выбран для оценки влияния персонала и оборудования на динамику итогового результата:

$$MTBF_p = \frac{t_n}{\text{число отказов в производительное время} + 1}, \quad (2)$$

где t_n — производительное время.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом каждое отклонение любого из параметров считается отказом общего чистого производственного помещения. Однако поддержание заданного класса чистоты зависит от множества факторов, а не только от качества и настроек оборудования чистых производственных помещений. Это приводит к возникновению проблемы релевантности расчетов и фактического состояния помещения.

Для достижения релевантности расчетов введены аналогичные коэффициенты K_{uptime} и $MTBF_p$ по отдельным показателям. Основными показателями окружающей среды выбраны класс чистоты помещения, температура и относительная влажность.

Работа с полученными результатами

Коэффициент K_{uptime} по показателю чистоты дает оценку работоспособности действующих протоколов контроля чистоты и систем по созданию и поддержанию параметров микроклимата.

Коэффициент $MTBF_p$ в большей степени оценивает качество проводимой уборки, правильность выбора оборудования и оснастки чистого помещения, а также соблюдение персоналом, работающим с чистыми производственными помещениями, требований чистоты.

Коэффициенты K_{uptime} по температуре и влажности оценивают правильность выбранных решений при проектировании, а динамика их изменения — техническое обслуживание вентиляционных систем для чистого помещения.



Так, при одновременности падения $MTBF_p$ и роста K_{uptime} по показателю температуры или влажности в течение длительного времени при одинаковом количестве замеров можно утверждать, что:

- 1) протокол чистоты выбран правильно;
- 2) устранение отклонений происходит оперативно;
- 3) системы по созданию и поддержанию параметров микроклимата выбраны неверно.

Заключение

Показана эффективность предложенного алгоритма расчета надежности чистого производственного помещения по показателям в определении узких мест на всех стадиях создания и эксплуатации чистых производственных помещений.

Алгоритм также эффективен в оценке эффективности чистых производственных помещений по всем областям эксплуатации согласно ГОСТ Р ИСО 14644-5 «Эксплуатация» при детализации программ контроля соответствующего направления.

Литература

1. ООО «Асинком», ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. — Москва, 2011. — 35 с.
2. SEMI E10: Equipment Reliability, Availability, Maintainability and Utilization. — 72 Victoria St S, Suite 400 Kitchener, ON Canada N2G 4Y9.

УДК. 004.8, 004.27, 538.9

Нейроморфное онлайн-обучение с подкреплением с мемристивной пластичностью**Власов Д. С., Миннеханов А. А., Рыбка Р. Б., Давыдов Ю. А., Сбоев А. Г., Серенко А. В., Ильясов А. И., Демин В. А.***НИИ «Курчатовский институт»**123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1**demin.vyacheslav@mail.ru*

Впервые представлена парадигма обучения с подкреплением для архитектуры импульсной нейронной сети с локальной динамической пластичностью на основе мемристоров. Модели такой пластичности для двух видов мемристоров с разными механизмами резистивного переключения используются при имитационном исследовании решения задачи удержания равновесия на платформе с шестом. С применением схемы временного кодирования на основе гауссовых рецептивных полей и простых токовых импульсов подкрепления, определяемых знаком изменения вознаграждения, демонстрируется успешное обучение для обоих типов мемристивной пластичности с низкой латентностью, позволяющей организовать обучение в режиме реального времени.

Ключевые слова: мемристор; STDP; обучение с подкреплением; мемристивная синаптическая пластичность; импульсные нейронные сети; нейроморфные вычисления.

Нейронные сети, реализованные аппаратно на основе мемристоров, могут обеспечить быстрые и эффективные вычисления в памяти, но традиционные методы обучения, такие как обратное распространение ошибки, применимы в таких системах с большими аппаратными накладными расходами. Импульсные, или спайковые, нейронные сети (СНС) представляются весьма многообещающими в этом отношении, поскольку их синаптические веса могут изменяться локально самоорганизованным образом без необходимости привлечения глобальной информации, добываемой за счет обработки данных по весам и активностям многих элементов сети. Эта проблема весьма актуальна для решения задач управления с использованием методов обучения с подкреплением нейронных сетей, поскольку они весьма чувствительны к любому источнику стохастичности при инициализации модели, обучении или процедуре принятия решений. В этой статье представлен алгоритм онлайн-обучения с подкреплением, в котором изменение синаптических весов выполняется после обработки каждого состояния среды во время генерации данных при взаимодействии с окружающей средой. Еще одной новой особенностью алгоритма является то, что он применяется к СНС с мемристивными STDP-подобными правилами обучения. Функции пластичности получены аппроксимацией экспериментальных данных измерений с использованием реальных мемристоров на основе поли-*n*-ксилилена и нанокompозита CoFeB-LiNbO₃. СНС состоит из интегрирующих нейронов с утечкой, состояния окружающей среды кодируются моментами импульсов входных нейронов, а управляющее воздействие декодируется по первому спайку выходных нейронов.



Предложенный алгоритм обучения успешно решает задачу удержания шеста в вертикальном положении на подвижной платформе. Данный результат представляется первым шагом реализации процедуры обучения ИИ-агентов с подкреплением в режиме реального времени в среде с непрерывным контролем, которое может быть имплементировано на нейроморфных вычислительных системах с мемристивными синапсами.

Работа поддержана грантом Минобрнауки РФ № 74/21–СИН 1357 от 26.11.2021 г.

УДК 621.38-022.532

Современное состояние и перспективы КМОП-интеграции мемристивных устройств

Михайлов А. Н.¹, Грязнов Е. Г.¹, Коряжкина М. Н.¹, Лукоянов В. И.¹,
Слиянков Ю. Г.¹, Андреева Н. В.², Смирнов В. А.³, Федотов А. А.³

¹ ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

mian@nifti.unn.ru

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

³ Южный федеральный университет

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

Обсуждаются основные тренды и достижения в мире и России на пути к созданию КМОП-интегрированных мемристивных устройств и функциональных блоков на основе эффекта резистивного переключения в металлооксидных наноструктурах как новой элементной базы нейроморфных систем искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейроморфная вычислительная система; мемристор; КМОП-интеграция.

Введение

История активного развития и внедрения технологий искусственного интеллекта (ИИ) насчитывает более семи десятилетий, в течение которых мы наблюдали не одну «зиму» и не одну «весну», что связано с циклической сменой стадий повышенного ажиотажа и разочарования инвесторов. Ключевую роль здесь играет аппаратное обеспечение, которое в основном накладывает фундаментальные ограничения на каждом цикле развития технологий ИИ и не позволяет вовремя удовлетворять перегретые ожидания общества. Удовлетворить все более серьезные требования к используемой вычислительной технике и избежать очередной волны похолодания в развитии ИИ позволяют своевременная разработка и технологическое освоение новой элементной базы микро- и наноэлектроники, представленной мемристорами (резистивными элементами с памятью — Resistive Random-Access Memory, RRAM) и мемристивными системами, которые обеспечивают аналоговые вычисления в памяти и массовый параллелизм в обработке информации, подобно тому, как это имеет место в мозге [1]. Соответствующие нейроморфные технологии только вступают в стадию зрелости и ведут к созданию широкого спектра продуктов для целей искусственного и гибридного интеллекта. В данной работе проведен анализ современного состояния и перспектив КМОП-интеграции мемристивных устройств, функционирующих на основе эффекта резистивного переключения в тонкопленочных наноструктурах «металл — оксид — металл» и демонстрирующих наилучшие параметры, необходимые для применений в энергоэффективных и масштабируемых нейроморфных вычислительных системах.

Результаты исследования

Пронализировано современное состояние исследований и разработок мемристивных устройств и функциональных блоков для применений в качестве новой



элементной базы информационно-вычислительных систем искусственного интеллекта, построенных на принципах функционирования биологических нейронных сетей. Рассмотрены различные физико-химические механизмы и транспортные явления, ответственные за обратимую перестройку дефектно-примесного состава в тонкопленочных структурах на основе оксидов металлов, приводящую к изменению их сопротивления (резистивному переключению). Проведен сравнительный анализ параметров мемристивных устройств, достигнутых передовыми зарубежными и российскими научными группами. Среди них следует отметить динамический диапазон и стабильность резистивных состояний во времени, их устойчивость к многократным переключениям, а также многоуровневый (аналоговый) характер изменения сопротивления, важные для реализации аналоговых вычислений в памяти. Обсуждаются перспективы и возможности для интеграции мемристивных структур с управляющими схемами в верхних слоях металлизации приборного слоя КМОП, а также имеющиеся успешные примеры такой интеграции в России.

Заключение

На основе проведенного анализа сделаны выводы о том, что КМОП-интеграция новых мемристивных наноматериалов является необходимым условием для демонстрации их применимости в информационно-вычислительных системах ИИ, а также о возможности такой демонстрации для различных вариантов мемристивных структур на базе единой технологической платформы КМОП КНИ 0,35 мкм с последующим масштабированием технологии. Результаты могут быть использованы при создании макетов программно-аппаратных комплексов нейроморфных вычислительных систем на основе КМОП-интегрированных мемристивных устройств (ячеек энергонезависимой резистивной памяти RRAM) для своевременной организации доступа разработчиков к новому аппаратному обеспечению в областях искусственного интеллекта и нейрогибридных технологий.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»

Литература

1. Mikhaylov A. N. et al. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. — В печати.

УДК 004.383.8.032.26

Аналоговые нейронные и синаптические КМОП-элементы с цифровым управлением для аппаратной реализации импульсных нейронных сетей

Рындин Е. А., Андреева Н. В.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф
nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com

Разработаны варианты схемной и топологической КМОП-реализации искусственных нейронов и синапсов аналоговых асинхронных импульсных нейронных сетей с аппаратной реализацией процесса обучения. Приведены результаты моделирования нейронных и синаптических IP-блоков, получены оценки их энергопотребления.

Ключевые слова: импульсная нейронная сеть; искусственный нейрон; искусственный синапс; КМОП IP-блоки.

Импульсные нейронные сети (ИНС) рассматриваются как наиболее биологически реалистичный вариант нейроморфных архитектур, в которых информация распространяется асинхронными импульсами, а параметризация (обновление синаптических весов) в режиме обучения осуществляется в соответствии с правилами синаптической пластичности [1]. При этом актуальной задачей является аппаратная реализация ИНС (включая режим обучения) на основе аналоговых асинхронных КМОП IP-блоков для достижения максимальных показателей производительности, энергоэффективности и технологичности.

Для решения данной задачи предлагается всю обработку данных в ИНС, включая ввод, вывод, пред- и постобработку, выполнять асинхронными аналоговыми КМОП IP-блоками, а параметризацию (изменение синаптических весов) — цифровыми КМОП IP-блоками. При таком подходе реализация асинхронных ИНС возможна без использования ЦАП и АЦП с существенной экономией площади нейрочипа и повышением производительности и энергоэффективности, особенно в режиме обучения.

На рис. 1 приведены схемы синаптического (рис. 1а) и нейронного (рис. 1б) КМОП IP-блоков, разработанные в рамках рассмотренного подхода.

Синаптический IP-блок (рис. 1а) использует последовательно-параллельное соединение «весовых» ($VT3, VT5, VT7, VT9, VT11, VT13$) и ключевых ($VT4, VT6, VT8, VT10, VT12, VT14$) МДП-транзисторов. Затворы «весовых» транзисторов объединены в цифровую управляющую шину S , номер разряда которой i определяет ширину каналов соответствующих транзисторов как $W_i = 2^i W_0$, что обеспечивает линейную зависимость синаптического тока I_{OUT} от цифрового кода $S5-S0$ (рис. 2).

Нейронный IP-блок (рис. 1б) представляет собой нейрон Leakage Integrate and Fire (LIF), включающий интегратор с утечкой ($C_M, VT1$), компаратор ($DA1$), формирователи импульсов ингибирования ($DA2, C_i, VT5 - VT7$) и рефрактерности ($DA3, C_R, VT4, VT8, VT9$), схему сброса мембранного потенциала интегратора ($DD1, VT2, VT3$).

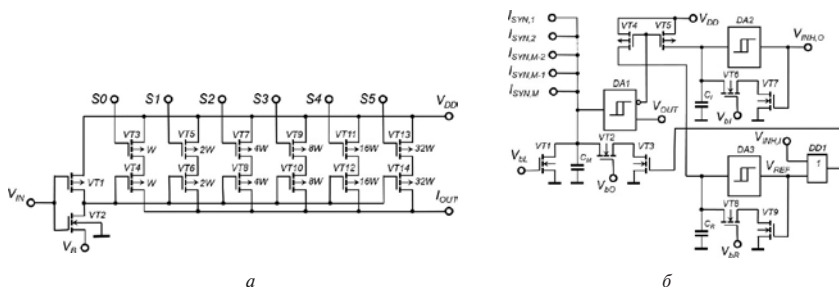


Рис. 1. Схемы синаптического (а) и нейронного (б) КМОП IP-блоков: V_{DD} — напряжение питания; V_{IN} — входное напряжение; I_{OUT} — выходной ток; V_B — напряжение, задающее шаг изменения проводимости синапса; S — цифровая управляющая шина; W — минимальная ширина канала МДП-транзисторов; $I_{SYN,1}$ – $I_{SYN,M}$ — входные синаптические токи; V_{bl} , V_{bo} , V_{bi} , V_{br} — напряжения, задающие постоянную времени утечки интегратора, длительность выходных импульсов нейрона V_{OUT} , периоды ингибирования (длительность импульсов $V_{INH,D}$) и рефрактерности (длительность импульсов V_{REF}) соответственно; $DA1$ – $DA3$ — триггеры Шмитта

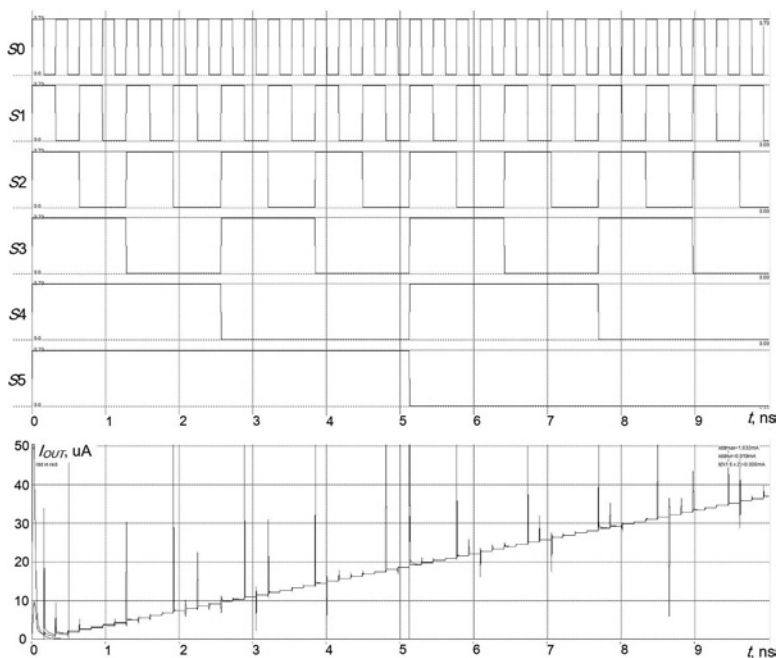


Рис. 2. Зависимость синаптического тока I_{OUT} от управляющего кода $S5$ – $S0$

Топология КМОП-блока ИНС, состоящего из нейронного и трех синаптических IP-блоков, приведена на рис. 3. При проектной норме 50 нм нейронный IP-блок имеет размеры $8,1 \times 2,75$ мкм, а синаптический — $8,8 \times 1$ мкм.

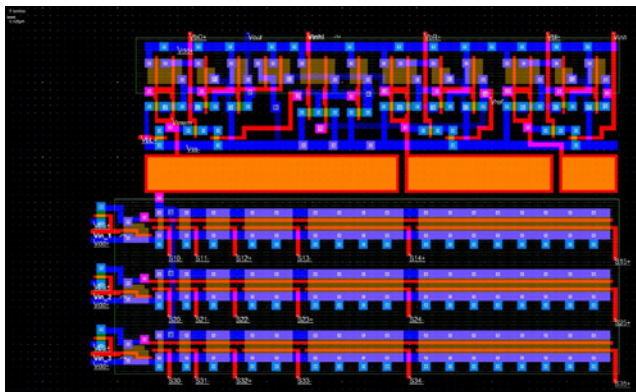


Рис. 3. Топология блока ИНС (КМОП 50 нм)

На рис. 4 показаны временные диаграммы блока ИНС при асинхронном поступлении входных импульсов.

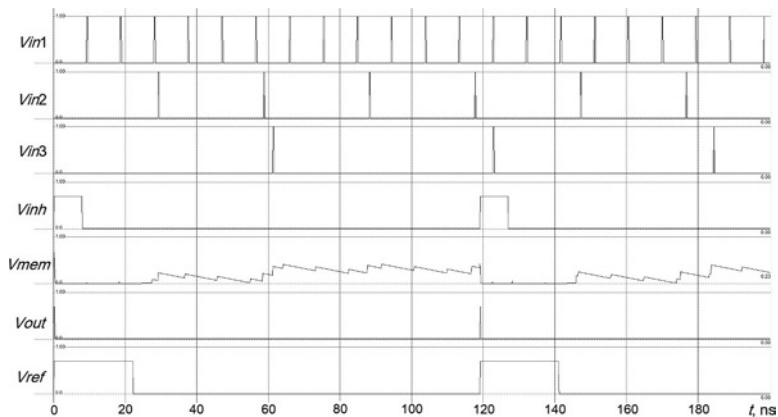


Рис. 4. Результаты моделирования блока ИНС: V_{in1} , V_{in2} , V_{in3} — входные импульсы; V_{mem} — мембранный потенциал; V_{out} — выходные импульсы; V_{inh} , V_{ref} — импульсы, определяющие периоды ингибирования и рефрактерности

В соответствии с результатами моделирования средняя потребляемая мощность блока ИНС (рис. 3, 4) при частоте следования входных импульсов более 110 МГц составляет 6,3 мВт.



*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ,
грант FSEE-2020-0013*

Литература

1. Chicca E., Stefanini F., Bartolozzi C., Indiveri G. Neuromorphic Electronic Circuits for Building Autonomous Cognitive Systems // Proc. IEEE, 2014. Vol. 102. P. 1367–1388.

УДК 519.6:004.3:004.92

Интеллектуальные программные системы для создания ячеек энергонезависимой памяти**Абгарян К. К.***Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
kristal83@mail.ru*

Рассматриваются актуальные методы и средства компьютерного моделирования, применяемые для создания среды автоматизированного проектирования элементов энергонезависимой памяти и устройств на их основе. Представлены особенности и основные характеристики разрабатываемой интеллектуальной программной системы.

Ключевые слова: TCAD-система; ячейка энергонезависимой памяти; полупроводниковые структуры; интеллектуальная программная система; машинное обучение.

В последнее время усилился интерес к элементам энергонезависимой памяти. Такие элементы позволяют существенно увеличить плотность интеграции, но вместе с этим требуют более точного моделирования и выбора режимов переключения.

Сегодня проектирование и оптимизация полупроводниковых приборов и технологий их производства ведутся с использованием средств автоматизированного проектирования TCAD (Technology Computer-Aided Design). Данные подходы позволяют сократить время и затраты на разработку новых устройств и технологий, а также повысить их надежность и производительность. В докладе рассматриваются актуальные методы и средства компьютерного моделирования, применяемые для создания среды автоматизированного проектирования элементов энергонезависимой памяти и устройств на их основе. В основу разработки положена многомасштабная схема моделирования, предполагающая рассмотрение физических явлений в материалах и приборах микроэлектроники, начиная с явлений атомарного и молекулярного масштаба и заканчивая характеристиками приборных структур. Представлены оригинальные решения, позволяющие автоматизировать процесс компьютерного моделирования и подготовить основу для создания интеллектуальных программных систем.

Важным элементом, применяемым для интеллектуализации разрабатываемой программной системы, является создание новых вычислительных средств. Они позволяют на базе имеющихся квантово-механических расчетов, применяя алгоритмы машинного обучения, в частности генеративные нейронные сети, проводить скрининг и выявлять новые стабильные полупроводниковых структуры для ячеек энергонезависимой памяти в целях повышения их надежности и производительности.

Литература

1. Абгарян К. К., Гаврилов Е. С. Интеграционная платформа для многомасштабного моделирования нейроморфных систем // Информатика и ее применение, 2020. — № 2. — С. 104–111.
2. Siriwardane E. M. D., Zhao Y., Perera I. et al. Generative design of stable semiconductor materials using deep learning and density functional theory // npj Comput. Mater., 2022. 8 (1). Article 1.



УДК 004.896

Интеллектуальные системы для организации многомодального человеко-машинного взаимодействия

д. т. н., проф. Карпов А. А.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН

199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия, 39

karpov@ias.spb.su

Анализируется современное состояние дел в сфере разработки интеллектуальных интерфейсов и систем, направленных на организацию естественного человеко-машинного взаимодействия. Рассматриваются примеры интеллектуальных систем анализа и синтеза многомодальной информации, разработанные в СПб ФИЦ РАН.

Ключевые слова: искусственный интеллект; интеллектуальные интерфейсы; человеко-машинное взаимодействие; многомодальная информация; большие языковые модели.

Интеллектуальные интерфейсы и системы человеко-машинного взаимодействия подразделяются на компьютерные решения для синтеза и анализа многомодальной информации (аудио, видео, текст, биологические сигналы и др.). Интеллектуальный синтез информации предоставляет многомодальную информацию от компьютерных систем пользователям в удобном и естественном виде. Современные системы интеллектуального синтеза информации, как правило, проектируются на основе различных генеративных искусственных нейронных сетей, таких как нейросетевые модели-трансформеры с механизмами внимания, в том числе генеративных моделях типа GPT (Generative pre-trained transformer). Системы интеллектуального анализа информации, обрабатывающие информацию от пользователей компьютерных систем и роботов, также активно используют нейросетевые модели-трансформеры с механизмами внимания для автоматического распознавания/предсказания пользовательской многомодальной информации [1].

В докладе рассмотрены примеры многомодальных интеллектуальных систем для организации человеко-машинного взаимодействия, разработанные в последние годы в лаборатории речевых и многомодальных интерфейсов СПб ФИЦ РАН, в том числе многомодальное распознавание аффективных (психоэмоциональных) состояний человека по одновременному анализу аудио, видео и текстовой информации [2]; аудиовизуальное распознавание персональных качеств личности человека; аудиовизуальное распознавание голосовых команд водителя автомобиля [3], а также другие системы.

Литература

1. Карпов А., Двойникова А., Ryumina E. Intelligent Interfaces and Systems for Human-Computer Interaction // Proc. 7th International Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” ITI-2023, Lecture Notes in Networks and Systems, 2023.
2. Ryumina E., Markitantov M., Karpov A. Multi-Corpus Learning for Audio-Visual Emotions and Sentiment Recognition // Mathematics, 2023. Vol. 11. № 16. ID 3519.

3. Аксёнов А.А., Рюмина Е.В., Рюмин Д.А., Иванько Д.В., Карпов А.А. Нейро-сетевой метод визуального распознавания голосовых команд водителя с использованием механизма внимания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2023. — Т. 23. — № 4. — С. 767–775.



УДК 538.182

Популяционная динамика спайковых нейронных сетей при решении задач вычислительной нейронауки

Масленников О. В.

*Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН»
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46
olmaov@ipfran.ru*

В докладе представлен подход к построению и результаты моделирования рекуррентной спайковой нейронной сети, настроенной методами машинного обучения выполнять семейство целевых задач, инспирированных экспериментами когнитивной нейронауки.

Ключевые слова: рекуррентная нейросеть; нелинейная динамика; спайковый нейрон; когнитивная задача; машинное обучение; вычислительная нейронаука.

Введение

Одним из важных направлений на стыке вычислительной и когнитивной нейронауки, с одной стороны, и систем искусственного интеллекта — с другой, является построение и анализ функциональных искусственных нейронных сетей. В качестве целевых задач для таких систем выбираются функции преобразования входных стимулов в выходные, имеющие своим прототипом эксперименты в области когнитивной нейронауки. В данных экспериментах происходит одновременная фиксация поведенческих переменных и нейрофизиологических данных, что позволяет соотносить нейрональную активность с сенсорными и моторными переменными. Важным подспорьем в понимании механизмов работы биологических сетей в данном случае является разработка модельных нейронных сетей, производящих аналогичные функции, анализ которых на предмет структуры и активности искусственных нейронов может пролить свет на принципы функционирования биологического прототипа.

Модель

В данной работе предложена модель в виде спайковой рекуррентной нейронной сети, методами машинного обучения настроенная на выполнение функций, инспирированных рядом нейробиологических экспериментов, связанных с выполнением базовых сенсорно-моторных и когнитивных задач классификации зашумленного сигнала. Отличительные особенности предложенной модели: (1) спайковые нейроны в качестве базовых элементов, (2) наличие нескольких задач, решаемых одной сетью, (3) «обратная инженерия» системы методами нелинейной динамики. В результате анализа динамики и структуры обученной сети, представляющей многомерную динамическую систему, установлен ряд явлений, качественно воспроизводящих наблюдаемые в нейрофизиологических экспериментах эффекты: (1) появление специализированных функциональных кластеров, (2) смешанная селективность, (3) кодирование различных этапов целевых задач посредством специальных траекторий в пространстве состояний популяционной активности, (4)

наличие причинно-действенных связей между нейронной динамикой и функциональными свойствами сети.

Заключение

В работе исследованы механизмы решения различных когнитивных задач искусственной спайковой нейронной сетью, которая обучена на основе методов машинного обучения. Проанализированы траектории в пространстве активности сети для каждой когнитивной задачи, установлены динамические механизмы решения каждой задачи. Проанализировано разбиение нейросети на подгруппы с различной ролью при решении определенных задач.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-72-10088

Литература

1. Pugavko M. M., Maslennikov O. V., Nekorkin V. I. Multitask computation through dynamics in recurrent spiking neural networks // Scientific Reports, 2023. Vol. 13. № 1. P. 3997.
2. Масленников О. В., Пугавко М. М., Шапин Д. С., Некоркин В. И. Нелинейная динамика и машинное обучение рекуррентных спайковых нейронных сетей // Успехи физических наук, 2022. — Т. 192. — № 10. — С. 1089–1109.



УДК 004.942, 519.876.5

Гомотопически расширенные нейронные операторы для решения дифференциальных уравнений в частных производных

Герасимов И. В., Седунов С. А.

ПАО «Сбербанк России»

117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19

Разработан подход с использованием гомотопии для обучения нейрооператоров для решения дифференциальных уравнений в частных производных, таких как волновое уравнение, уравнение теплопроводности и уравнение Навье — Стокса. Данный подход позволяет получить сходимость во время обучения без использования численного решения уравнений в обучающей выборке.

Ключевые слова: Neural Operator; PDE; Deep learning; Homotopy.

В области решения дифференциальных уравнений в частных производных использование нейронных операторов стало многообещающей парадигмой, использующей возможности нейронных сетей для аппроксимации решений ДУ. Эта работа развивает новое направление, исследуя интеграцию гомотопических методов с обучаемыми подходами для решения PDE без использования численных и аналитических решений. Наша гипотеза состоит в том, что, обеспечив постепенное открытие эволюции решения во время обучения, можно быстро и эффективно сходиться к решению. Гомотопия — концепция, уходящая корнями в топологию, помогает поддерживать непрерывность и постепенные переходы в пространствах решений. Внедряя механизмы, основанные на гомотопии, в нейронные операторы, мы преодолеваем ограничения, связанные с зависимостью от числовых данных, позволяя сети понимать и экстраполировать базовые паттерны, управляющие ДУ. Благодаря экспериментам и проверке различных сценариев PDE наши результаты демонстрируют жизнеспособность предложенного подхода. Гомотопически усиленные нейронные операторы демонстрируют ускоренную сходимость и повышенное обобщение при решении PDE по сравнению с обычными методами. Это исследование не только расширяет границы применения нейронных операторов, но и открывает возможности для использования топологических принципов для расширения возможностей методов машинного обучения в научных вычислениях.

Литература

1. Kovachki N., Li Z., Liu B., Azizzadenesheli K., Bhattacharya K., Stuart A. and Anandkumar A. Neural Operator: Learning Maps Between Function Spaces // JMLR, 2021. doi:10.48550/arXiv.2108.08481.
2. Li Z., Kovachki N., Azizzadenesheli K., Liu B., Bhattacharya K., Stuart A. and Anandkumar A. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations // ICLR, 2021. doi:10.48550/arXiv.2010.08895.

УДК 004.942

Методы исследования эволюции мемристора на основе анализа серии его переключений

Жевненко Д. А.¹, Мещанинов Ф. П.¹, Теплов Г. С.¹, к. ф.-м. н., Горнев Е. С.^{1,2}, чл.-корр. РАН, д. т. н.

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе предлагается подход к исследованию эволюции состояния мемристора на основе анализа серии его переключений совместно с периодической регистрацией вспомогательных ВАХ. Рассматривается совместное использование классических методов компактного моделирования и машинного обучения для описания эволюции состояния мемристора Ni/Si₃N₄/p⁺Si.

Ключевые слова: мемристор; нитрид кремния; деградация; машинное обучение.

Введение

Одним из наиболее перспективных микроэлектронных устройств для разработки нейроморфной элементной базы является мемристор [1], существование которого было впервые подтверждено в 2008 году в лаборатории НР [2]. Несмотря на перспективные результаты, рабочая частота и высокий уровень нестабильности ограничивали применимость разработанного устройства на основе оксида титана. Дальнейшие исследования продемонстрировали возможность получения мемристорного эффекта с использованием различных материалов [3], включая актуальные относительно существующих производственных технологий.

Структуры мемристоров отличаются целым спектром новых свойств, исследование динамики которых ограничивается применимостью классических методов и моделей для высокочастотных нанометровых устройств. В настоящий момент одним из основных направлений в моделировании является использование компактных поведенческих моделей, позволяющих эффективно воспроизводить характеристики мемристора для схемотехнического проектирования комплексных устройств. Основной слабостью компактных моделей является их ограниченная применимость в задачах описания серий переключения устройств. Данный эффект связан с ограниченностью типичных методов экстракции параметров модели из серий ВАХ устройств, не позволяющих корректно учитывать процессы эволюции во времени и требующих дополнительного обучения модели с течением времени.

В работе [4] нами был предложен новый метод исследования деградации мемристора, соответствующий его условиям эксплуатации, — в стандартном процессе переключения мемристора раз в сто циклов регистрируется вспомогательная ВАХ. Нами было показано, что снятые таким образом ВАХ вблизи области со стабильным сопротивлением могут служить для описания промежуточных состояний устройства в ходе деградации.



В данной работе представлены результаты по совместному использованию классических методов компактного моделирования и машинного обучения к задачам анализа эволюции устройства на основе полученных данных. В частности, в работе рассматривается шесть образцов мемристора на основе Si_3N_4 , на каждом из которых выполнен описанный эксперимент (рис. 1).

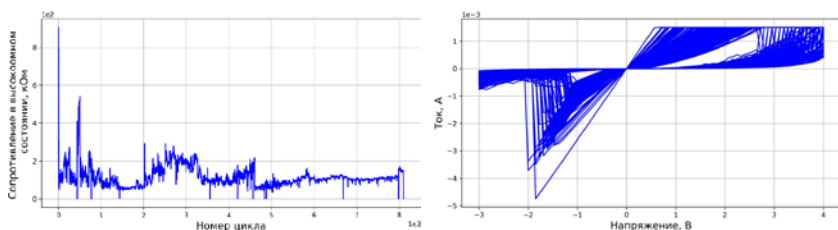


Рис. 1. Изменение сопротивления в зависимости от номера переключения и связанные вспомогательные ВАХ, которые были зарегистрированы раз в сто переключений

Компактная модель, представленная в [5], была использована для анализа ВАХ, методы на основе CNN-LSTM-структур [6] были использованы для предсказания свойств по динамике изменения состояния устройств. Результаты моделирования показали высокую перспективность в использовании комбинированных методов к анализу и количественному описанию эволюции мемристорных систем на основе $\text{Ni}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{p}^+\text{Si}$.

Литература

1. Chua L. Memristor-The missing circuit element // IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971. № 5. Vol. 18. P. 507–519.
2. Strukov D. B. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. № 7191. Vol. 453. P. 80–83.
3. Chen S., Valov I. Design of Materials Configuration for Optimizing Redox-Based Resistive Switching Memories // Advanced Materials, 2022. № 3. Vol. 34. P. 2105022.
4. Teplov G. et al. Memristor Degradation Analysis Using Auxiliary Volt-Ampere Characteristics // Micromachines, 2022. № 10. Vol. 13. P. 1691.
5. Zhevnenko D. et al. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110382.
6. Bohara B. et al. Short-Term Aggregated Residential Load Forecasting using BiLSTM and CNN-BiLSTM // Sakheer, Bahrain: IEEE, 2022. P. 37–43.

УДК 621.3.049

Нейроморфный процессор «АЛТАЙ» для решения задач обработки сигналов в реальном времени

Канглер В. М.

ООО «Мотив НТ»

г. Новосибирск

В работе представлены последние результаты разработки и проверки на тестовых задачах линейки отечественных нейроморфных процессоров «Алтай». Проведенные исследования показали ряд преимуществ нейроморфных вычислителей в области обработки сигналов в реальном времени. Прежде всего такие процессоры актуальны при интеллектуальной обработке данных с требованиями ультранизкого энергопотребления, низкой задержки, сохранения персональных данных, масштабируемости.

Ключевые слова: нейроморфные вычисления; событийный процессор; импульсная нейронная сеть.

В работе представлены последние результаты разработки и проверки на тестовых задачах линейки отечественных нейроморфных процессоров (НП) «Алтай». В проекте мы применяем технологию «вычислений в памяти», когда декодер инструкций, арифметико-логические устройства и другие узлы располагаются в непосредственной близости с блоками памяти. Кроме того, такая архитектура предполагает высокопараллельную организацию вычислений. Нейроморфный процессор может быть использован для исполнения как традиционных искусственных нейронных сетей, так и импульсных нейронных сетей. Функциональность нейрона в импульсной нейронной сети более расширенная, и его поведение во времени описывается дифференциальным уравнением или системой уравнений. Однако нейронные сети не ограничивают функциональную область НП, которые также могут быть использованы для исполнения кода общего назначения с учетом ряда ограничений. Использование нейроморфных процессоров приводит во многих задачах к лучшим показателям по энергопотреблению, производительности и задержке. Ввиду меньших объемов занимаемой памяти и энергоэффективности нейроморфные вычислители привлекательны для имплементации на локальных устройствах (edge devices) [1], что позволяет снизить объем данных, передаваемый на сервер, решает проблему утечки персональных данных, а также делает систему более производительной и экономной. Сегодня активно ведется прикладное тестирование прототипа НП «Алтай-1» на стендах с целью раскрыть в полной мере потенциал применимости процессора и произвести измерения производительности, энергопотребления, отказоустойчивости и др. Одним из примеров таких стендов может служить система распознавания уличных звуков. Звукозаписи подаются на нейронную сеть фрагментами длиной 500 мс. Энергопотребление при исполнении на НП «Алтай-1» составляет 0,07 Вт в то время, когда исполнение на CPU требует 50,8 Вт.

Также в работе представлены результаты разработки проекта НП следующего поколения «Алтай-3» и его программного обеспечения. Этот проект нового процессора включает в себя такие особенности, как событийность, высокопараллельная архитектура, возможность управлять микрокодом исполняемых инструкций,

оптимизированная система обмена сообщениями и сбалансированный дизайн памяти для сообщений, регистров, инструкций и управления конфигурацией ядер. НП предназначен для высокоэффективного исполнения нейронных сетей и будет использоваться для задач распознавания и классификации видео- и аудиообразов, интегрирования и обработки информации от различных датчиков и сенсоров, обработки физиологических сигналов, онлайн-обучения и так далее.

Литература

1. Special Session: Neuromorphic hardware design and reliability from traditional CMOS to emerging technologies.
2. Pavanello F. et al. // IEEE 41st VLSI Test Symposium, USA, 2023. DOI: 10.1109/VTS56346.2023.10139932.

УДК 538.935

Перколяционные мемристивные системы наночастиц для резервуарных вычислений

Василевская Ю. О.^{1,2}, к. т. н. Савицкий А. И.^{1,2}, д. ф.-м. н. Сибатов Р. Т.^{1,2}

¹ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

sibatov@tcen.ru

Синтезированы и исследованы перколяционные мемристивные сети на основе самоорганизующихся ансамблей наночастиц серебра, олова и золота, а также Ag/TiO₂. С помощью циклической вольт-амперометрии, возбуждения импульсным и ступенчатым напряжением исследовано переключение между мемристивным и емкостным состояниями ниже порога перколяции. Разработана стохастическая модель динамики сопротивления в перколяционных мемристивных сетях. Исследованы изменения свойств перколяционных мемристивных систем вследствие осаждения диэлектрических покрытий (в частности HfO₂). Разработаны мультieleктродные ячейки и устройство подключения к ЭВМ для оценки эффективности резервуарных вычислений на основе полученных мемристивных сетей.

Ключевые слова: массив наночастиц; мемристивная система; перколяция; нейроморфные вычисления; критические явления.

Существуют попытки [1, 2] разработать внутренние подобные мозгу архитектуры, которые могли бы поддерживать нейроморфные вычисления более естественным образом, чем стандартные (высокоорганизованные) архитектуры микросхем. Самоорганизующиеся перколяционные сети наночастиц и нанопроволок недавно стали перспективными системами для нейроморфных вычислений [3, 4].

В данной работе исследуются новые модели и реализации мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур для резервуарных вычислений и функционирования импульсных нейронных сетей. Изучены перколяционные свойства [5] и переключения квантованной проводимости при комнатной температуре в пленках наночастиц Ag, Au, Sn, Ag/TiO₂. Ансамбль наночастиц сформирован на электродах, имеющих различную геометрию: прямоугольную, треугольную и встречно-штырьевую, зазор между электродами составил 2 мкм. Рассматриваемые системы являются «нейроморфными» благодаря не только эффективной интеграции обработки и памяти в межсоединениях [6], но и их способности имитировать как порого-зависимую спайкоподобную динамику нейронов, так и синаптические веса на основе проводимости [7]. В системах генерируются критические лавины сигналов тока. Эти лавины количественно такие же, как наблюдаемые в корковой ткани, и являются признаками корреляций, необходимых для вычислений [8]. Критическая динамика наблюдается и в перколяционных системах около порога перколяции. Параметром порядка фазового перехода «металл — изолятор» выступает кондактанс системы, а управляющий параметр может быть связан с вероятностью p прохождения тока между соседними наночастицами. Эта вероятность



является динамической переменной, поскольку зависит от образования филаментов атомарного масштаба между соседними наночастицами.

Возникающую нелинейную динамику можно использовать для обучения, рассматривая перколяционные мемристивные наносистемы как вычислительный «резервуар», способный нелинейно преобразовывать динамические входные сигналы в многомерное пространство признаков, так что выходные данные являются линейно разделимыми. Авторы недавней работы [9] обнаружили, что наилучшая производительность перколяционных ансамблей наночастиц наблюдается в случае реализации топологии безмасштабной сети со степенным распределением числа связей между наночастицами в кластерах и едиными свойствами мемристивных элементов (подробнее см. [9]). Режим безмасштабной сети реализуется вблизи порога перколяции. Нами предложена вероятностная модель динамики сопротивления в перколяционных мемристивных сетях на основе устойчивой статистики Леви [5]. Энергопотребление исследуемых ансамблей для обработки одного импульса — не более 1 мкВт/импульс. Количество потенциальных межсоединений («искусственных синапсов») в мемристивных сетках наночастиц превышает 10^{14} на квадратный сантиметр. Реализованные мемристивные сетки могут находиться в критическом состоянии (вблизи порога перколяции) так, чтобы переключения сопротивления происходили при подаче постоянного или импульсного напряжения с амплитудой 1–15 вольт. Исследованы изменения свойств перколяционных мемристивных систем вследствие осаждения диэлектрических покрытий. Разработаны мультиэлектродные ячейки и устройство подключения к ЭВМ для оценки эффективности резервуарных вычислений на основе полученных мемристивных сеток.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (проект FNRМ-2022-0008)*

Литература

1. Roy K. et al. // Nature, 2019. 575.7784: 607–617.
2. Sun B. et al. // Materials Today Physics, 2021. 18: 100393.
3. Fang R. et al. // Materials Futures, 2023.
4. Milano G. et al. // Advanced Materials, 2022. 34.32: 2201248.
5. Sibatov R. T. et al. // Nanomaterials, 2023. 13.14: 2039.
6. Mehonic A. et al. // Advanced Intelligent Systems, 2020. 2.11: 2000085.
7. Hochstetter J. et al. // Nature Communications, 2021. 12.1: 4008.
8. Dunham C. S. et al. // Journal of Physics: Complexity, 2021. 2.4: 042001.
9. Mallinson J. B. et al. // Nanoscale, 2023. 15.22: 9663–9674.

УДК 53.06

Моделирование процессов многоуровневого переключения элементов энергонезависимой резистивной памяти, необходимых для создания нейроморфных систем**Ковешников С. В.¹, Ванькаев А. С.^{1,2}, Клюкина Е. В.^{1,3}, Федотов М. И.^{1,4,5}**

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru*

² *МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com*

³ *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru*

⁴ *АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
fedotov.mi@phystech.edu*

⁵ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
fedotov.mi@phystech.edu*

В данной работе проведено моделирование процессов переключения элементов резистивной памяти на основе оксида титана. Определены ключевые факторы, влияющие на воспроизводимость параметров переключения. Полученные результаты имеют большое значение для создания элементов памяти, способных работать в качестве искусственных синапсов.

Ключевые слова: элементы резистивной памяти; оксид титана; моделирование; многоуровневое переключение; нейроморфные системы.

Матрицы энергонезависимой резистивной памяти (RRAM) с улучшенными функциональными возможностями и надежностью будут иметь большое значение для разработки новых, более эффективных элементов нейроморфных устройств, в которых элементы резистивной памяти будут выполнять роль искусственных синапсов. Несмотря на значительный прогресс в разработке двухуровневых и многоуровневых элементов резистивной памяти на основе оксидов металлов, их практическое использование в матрицах памяти большого объема для нейроморфных систем ограничено рядом нерешенных фундаментальных проблем [1]. В первую очередь необходимо достижение ясного понимания физических процессов, происходящих в диэлектрике и на его границах раздела с металлическими электродами во время воздействия электрического поля, приводящего к биполярному резистивному переключению. Для достижения многоуровневого переключения наиболее важную роль играет процесс переключения в высокоомное резистивное состояние (Reset), во время которого проводимость через диэлектрик контролируется величиной максимального приложенного напряжения. На основании анализа литературных

данных и полученных нами экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что изменение тока в режиме Reset может быть резким (sharp Reset) или плавным (gradual Reset) даже для одной и той же ячейки памяти. Для достижения многоуровневого переключения плавный Reset является ключевым фактором [2]. Таким образом, выяснение физического механизма, ответственного за плавное изменение тока, протекающего через элемент резистивной памяти в режиме Reset, является важной научной задачей, решение которой позволит создавать мемристорные структуры с заданными физическими свойствами. В ходе проведенных нами исследований элементов памяти на основе оксида титана, характеризующихся филаментарным механизмом резистивного переключения и ярко выраженным плавным переключением в режиме Reset, нами получены данные, свидетельствующие о достижении нескольких надежных резистивных состояний (рис. 1). Для объяснения полученных результатов нами разработана гипотеза о коллективном воздействии нескольких параллельно включенных проводящих филаментов разной длины на изменение проводимости в режиме Reset. Результаты проведенных расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

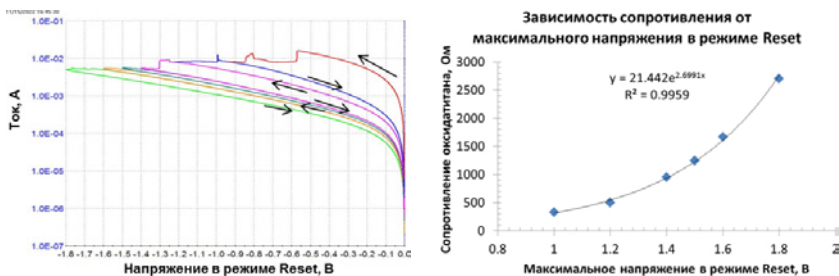


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики при многоступенчатом изменении напряжения в режиме Reset и зависимость сопротивления оксида титана (при напряжении считывания 0,1 В) от максимального напряжения в режиме Reset

Данная работа выполнена в рамках государственного задания 075-01304-23-00

Литература

1. Yang J.J., Strukov D.B. and Stewart D.R. Memristive devices for computing // Nat. Nanotechnol, 2012. Vol. 8. № 1. P. 13–24.
2. Fedotov M. I., Korotitsky V. I. and Koveshnikov S. V. Experimental and Theoretical Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021. P. 26–32. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507665.

УДК 621.382

Нейроморфные фотомемристорные сенсоры для автономного распознавания образов

Панин Г. Н.¹, Капитанова О. О.^{2,3}¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН**142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
rapin@iptm.ru*² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*³ *Центр фотоники и двумерных материалов
Московского физико-технического института,
141701, г. Долгопрудный*

Рассмотрены фотомемристоры на основе графена, оксида графена и дисульфидов переходных металлов с возможностью преобработки визуальной информации в фотомемристорном сенсоре.

Ключевые слова: фотомемристор; нейроморфные сенсоры; графен и производные графена; двумерные и нульмерные кристаллы; фотоиндуцированные фазовые переходы; нейроморфное распознавание образов.

Введение

Фотомемристорные структуры [1], контролируемые оптически и электрически, в последние годы активно исследуются для использования их для энергоэффективного автономного распознавания объектов, например в системах автопилота [2]. Фотомемристорные состояния в таких структурах, изготовленных на основе двумерных кристаллов, таких как графен, и квази-одномерных квантовых точек [3, 4], могут контролироваться светом и электрической поляризацией [1], окислительно-восстановительными реакциями [5], фотоиндуцированными структурными переходами [6]. Такие устройства демонстрируют динамическое поведение [7], необходимое для реализации нейроморфных вычислений внутри сенсора, и позволяют быстро и энергонезависимо детектировать [8] и предварительно обрабатывать визуальную информацию [9].

Нейроморфные фотомемристорные сенсоры

В данной работе рассмотрены фотомемристоры на основе графена, оксида графена и дисульфидов переходных металлов, а также вандерваальсовых гетероструктур с квантовыми точками, которые могут быть использованы для распознавания образов в широком УФ-ИК-диапазоне на основе преобработки информации в самом сенсоре.

Заключение

Разработка интеллектуальных фотосенсоров со встроенными нейронными сетями на основе низкоразмерных материалов является перспективным подходом к созданию энергоэффективных автономных систем нейроморфного широкополосного зрения.

*Работа выполнена при поддержке РФФ проекта № 23-49-00159 (П.Г.Н.)
и РФФИ проекта № 20-57-04010 (К.О.О.)*

Литература

1. Wang W., Panin G., Fu X. et al. MoS₂ memristor with photoresistive switching // *Sci. Rep.*, 2016. Vol. 6. P. 31224.
2. Panin G. N. Low-Dimensional Layered Light-Sensitive Memristive Structures for Energy-Efficient Machine Vision // *Electronics*, 2022. Vol. 11. № 4. P. 619.
3. Fu Xiao et al. Tunable UV-visible absorption of SnS₂ layered quantum dots produced by liquid phase exfoliation // *Nanoscale*, 2017. Vol. 9. № 5. P. 1820–1826.
4. Kovaleva N. N. et al. Efficient green emission from edge states in graphene perforated by nitrogen plasma treatment // *2D Materials*, 2019. Vol. 6. P. 045021.
5. Kapitanova O. O. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // *Journal of Materials Science & Technology*, 2020. Vol. 38. P. 237–243.
6. Fu X. et al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition // *Small*, 2019. Vol. 15. P. 1903809.
7. Gennady N., Panin G. N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021. Vol. 142. P. 110523.
8. Fu Xiao et al. Geometry-asymmetric photodetectors from metal–semiconductor–metal van der Waals heterostructures // *Materials Horizons*, 2022. Vol. 9. P. 3095–3101.
9. Fu X., Li T., Cai B. et al. Graphene/MoS_{2-x}O_x/graphene photomemristor with tunable non-volatile responsivities for neuromorphic vision processing // *Light Sci. Appl.*, 2023. Vol. 12. P. 39.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6

Электрическая схема запоминающего устройства нейропроцессора на основе мемристорно-диодного кроссбара и периферийной управляющей КМОП-логики

Писарев А. Д., Удовиченко С. Ю., Бусыгин А. Н.*Тюменский государственный университет**625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6**spcb.doc@gmail.com*

Разработана и численно промоделирована электрическая схема запоминающего устройства с периферийной КМОП-управляющей логикой. Периферийная схема имеет цифровое управление формирователями импульсов, драйверами входных и выходных проводников, которые обеспечивают работу матрицы в качестве массива электронных синапсов, реализованных на мемристорах в нейропроцессоре. Предложенная схема управления позволяет считывать и программировать состояние каждого мемристора. Это требуется для управления вводом/выводом сигналов запоминающего устройства на мемристорах, а также сохранения и переноса синаптических состояний нейросети, минуя повторное обучение нейропроцессора.

Ключевые слова: нейропроцессор; запоминающая матрица; мемристорно-диодный кроссбар; периферийная КМОП-управляющая схема; драйвер матрицы; демультимплексор; мультимплексор аналоговых сигналов.

В качестве одного из ключевых узлов нейропроцессора [1] используется сверхбольшая запоминающая матрица, представляющая собой массив искусственных электронных синапсов, с ячейками 1D2M, топологически скомпонованных в кроссбар [2]. В блоках нейронов нейропроцессора с помощью запоминающей матрицы кроме хранения данных выполняется операция взвешенного суммирования импульсов напряжения. Для организации работы этой матрицы в составе запоминающего устройства нейропроцессора разработана периферийная КМОП-управляющая схема, которая выполняет две функции — подачу и вывод информационных сигналов для кроссбара, а также осуществляет манипуляцию состоянием отдельных мемристоров.

Разработанная схема состоит из двух частей — группы драйверов входных и выходных шин с формирователем импульсов, выделенных на функциональной схеме запоминающего устройства, которая показана на рис. 1.

Все узлы периферийной управляющей схемы построены с использованием численных моделей интегральных полевых транзисторов. Схема имеет унифицированное питание от источника с уровнями напряжений, достаточными для программирования и необходимыми для считывания мемристоров: надпороговый (V_{dd}) и подпороговый ($V_{dd}/2$).

Электрическая схема запоминающего устройства нейропроцессора имеет три режима работы: основной режим взвешенного суммирования импульсов напряжения, режимы считывания и изменения состояний мемристоров кроссбара. В основном режиме системы адресации проводников кроссбара и драйверы выходных проводников отключены, драйвер входных проводников работает как

формирователь импульсов напряжения противоположной полярности. В режиме считывания с помощью систем адресации входных и выходных проводников выбираются требуемые строка и столбец в кроссбаре, а также мемристор в ячейке. На входные проводники подается напряжение, и с помощью АЦП измеряется ток через выбранный мемристор.

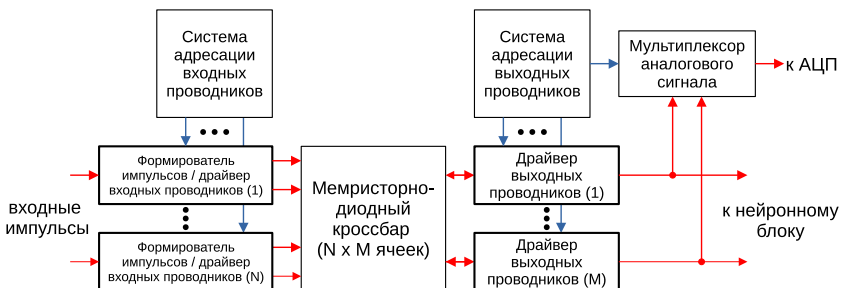


Рис. 1. Функциональная схема запоминающего устройства. Красными стрелками показаны импульсные сигналы считывания/записи, синими — логические сигналы управления КМОП-логикой

При изменении состояния мемристора на входные проводники кроссбара напряжение подается аналогично режиму считывания, а выходные проводники с помощью системы адресации и драйверов подключаются к источнику напряжения с полярностью, обратной полярности напряжения на выбранном входном проводнике. Таким образом, на мемристоре оказывается напряжение выше напряжения его переключения. Управляя количеством импульсов напряжения и/или их шириной, можно добиться установки заданного сопротивления мемристора.

На рис. 2. представлен результат численного моделирования в программе LTSpice процедуры считывания состояния мемристоров, соединенных с одной выходной шиной кроссбара с числом ячеек 8x8. В численном эксперименте требовалось считать состояния 16 мемристоров.

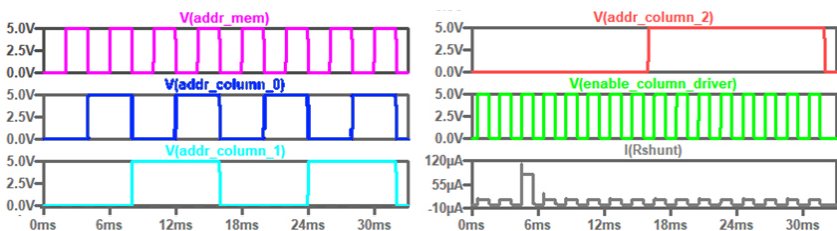


Рис. 2. Эпюры напряжений и тока, полученные при численном моделировании режима считывания состояний мемристоров

С помощью фиолетового сигнала (на рис. 2) выбирается один из комплементарных мемристоров ячейки запоминающей матрицы. Следующие три сигнала ($addr_column_x$) задают биты адреса входных проводников кроссбара. Адрес выходного

проводника фиксирован. Зеленый сигнал активирует подачу напряжения драйвером входного проводника. Серым цветом показан измеряемый ток.

Работоспособность электрической схемы запоминающего устройства подтверждается тем, что измеряемые токи, показанные серой кривой, соответствуют ранее заданным состояниям мемристора. В данном примере один из мемристоров второй ячейки полностью открыт, что отражается в виде высокого импульса на графике измеряемого тока (на рис. 2).

Используя численное моделирование, в настоящей работе провели анализ влияния числа ячеек в кроссбаре и их состояний на режимы считывания и изменения состояния выбранного мемристора с применением разработанной периферийной управляющей КМОП-логики.

Исследование выполнено при поддержке программы развития вузов Российской Федерации «Приоритет-2030» в Центре природовдохновенного инжиниринга Тюменского государственного университета

Литература

1. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. The biomorphic neuromorphic processor based on the composite memristor — diode crossbar // *Microelectronic journal*, 2020. 104827. DOI: 10.1016/j.mejo.2020. Art.104827.
2. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. 3D memory matrix based on a composite memristor–diode crossbar for a neuromorphic processor // *Microelectronic Engineering*, 2018. Vol. 198. P. 1–7.



УДК 538.9

Массивы кроссбар-мемристоров на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$ для нейроморфных приложений

Емелянов А. В., Ильясов А. И., Мацукатова А. Н., Черноглазов К. Ю.,
Ситников А. В., Рыльков В. В., Демин В. А.

НИИ «Курчатовский институт»

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Изучены структурные особенности и мемристивные свойства массивов кроссбар-структур на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$. Продемонстрирована возможность использования указанных массивов мемристоров для построения нейроморфных вычислительных систем.

Ключевые слова: мемристор; нейроморфные системы; нанокompозит; кроссбар-структура.

В настоящее время нейроморфные системы на основе мемристоров считаются перспективными для аппаратной реализации эффективных систем искусственного интеллекта [1]. Основным узким местом в аппаратной реализации этих систем является их сильная зависимость от присущего мемристорам разброса характеристик [2]. Для уменьшения разброса характеристик применяется подход инженерии дефектов в активном слое мемристоров [3]. В данной работе изучены мемристоры на основе нанокompозита $(\text{Co-Fe-B})_x(\text{LiNbO}_3)_{1-x}$ (CFB-LNO НК), обладающие многофиламентарным характером резистивного переключения (РП), демонстрирующие высокую выносливость и длительную стабильность и обладающие многоуровневым РП [4, 5].

Массив мемристоров был изготовлен с использованием лазерной фотолитографии в целях формирования рисунка электродных шин и ионно-лучевого напыления на оригинальной установке для нанесения активного слоя $(\text{LiNbO}_3$ толщиной ~10 нм и НК CFB-LNO толщиной ~290 нм с $x \approx 10\text{--}25$ ат. %). Подробности процесса изготовления можно найти в работе [6].

Изготовленные массивы мемристоров показали небольшие разбросы характеристик от цикла к циклу и от устройства к устройству, высокую пластичность (не менее 16 различных резистивных состояний) и выносливость (более 10^5 циклов РП). Результаты структурных исследований с использованием синхротронного излучения выявили особую роль бора в стабилизации РП мемристивных структур. Массивы кроссбар-структур были использованы для реализации гибридной сверточной нейронной сети, состоящей из аппаратного экстрактора признаков с двумя сверточными фильтрами 3×3 и программного классификатора [7]. Кроме того, с помощью моделирования было показано, что использование исследуемых мемристоров в адаптированной архитектуре перцептронного миксера приводит к высокой точности классификации изображений, устойчивой к мемристивным вариациям и залипшим устройствам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2021-1357

Литература

1. Wan W., Kubendran R., Schaefer C. et al. // *Nature*, 2022. 608, 504.
2. Matsukatova A. N., Prudnikov N. V., Kulagin V. A. et al. // *Adv. Intell. Syst.*, 2023. 5, 2200407.
3. Banerjee W., Liu Q., Hwang H. // *J. Appl. Phys.*, 2020. 127.
4. Emelyanov A. V., Nikiruy K. E., Serenko A. V. et al. // *Nanotechnology*, 2020. 31, 045201.
5. Martyshov M. N., Emelyanov A. V., Demin V. A. et al. // *Phys. Rev. Appl.*, 2020. 14, 1.
6. Ильясов А. И., Никируй К. Э., Емельянов А. В. и др. // *Российские нанотехнологии*, 2022. 17, 89.
7. Matsukatova A. N., Iliasov A. I., Nikiruy K. E. et al. // *Nanomaterials*, 2022. 12, 3455.



УДК 539.216.2

Формирование пленок оксидов металлов для создания нейроморфных структур машинного зрения робототехнических комплексов

Вакулов З. Е., Томинов Р. В., Дзюба Д. А., Хахулин Д. А., Казанцев В. Б., Смирнов В. А.

*Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристоривные наноматериалы», Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
zvakulov@sfnedu.ru*

В работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований закономерностей влияния условий синтеза нанокристаллических пленок LiNbO_3 , BaTiO_3 и ZnO методом импульсного лазерного осаждения на их морфологические и электрофизические параметры, а также резистивное переключение.

Ключевые слова: импульсное лазерное осаждение; пленки оксидов металлов; эффект резистивного переключения; нейроморфные структуры; робототехнические системы.

Использование нейроморфных структур может решить ряд проблем, связанных с эффективностью обработки данных, полученных от сенсоров [1]. На сегодняшний день одним из подходов для реализации таких систем является использование мемристоривных структур [2]. Скорость работы и энергопотребление подобных структур сильно зависят от их конструкции и используемых материалов [3]. Однако актуальной задачей являются исследование и установление закономерностей процессов получения оксидных материалов, поскольку ими определяются параметры изготавливаемых нейроморфных структур. Таким образом, целью работы являются разработка, изготовление и исследование нейроморфной структуры на основе мемристоривных кроссбаров для создания нейронных сетей систем машинного зрения робототехнических комплексов с применением искусственного интеллекта. В работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований закономерностей влияния условий синтеза нанокристаллических пленок LiNbO_3 , BaTiO_3 и ZnO .

В результате исследования влияния температуры отжига на параметры пленок ZnO установлено, что шероховатость поверхности пленок возрастает при температуре отжига более 1400°C . Подобный эффект может быть связан с приближением к температуре сублимации ZnO (1800°C): материал, осажденный на подложку, становится «активным», в результате чего происходит изменение структуры пленок. Исследование резистивных свойств показало, что пленки ZnO после отжига при температуре 1200°C переключаются из R_{HRS} в R_{LRS} при напряжении $\sim 2,0$ В. Для LiNbO_3 установлено, что при увеличении расстояния мишень — подложка от 20 до 120 мм концентрация носителей заряда уменьшается от $(3,3 \pm 0,2) \cdot 10^{13}$ до $(1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а подвижность носителей заряда увеличивается от $2,4 \pm 0,1$ до $39,5 \pm 2,8 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Путем оптимизации параметров для LiNbO_3 удалось добиться стабильного переключения в течение 10000 циклов ($R_{\text{HRS}}/R_{\text{LRS}} \sim 10$). Для BaTiO_3 при

увеличении температуры подложки от 300 до 600 °С шероховатость поверхности пленок BaTiO₃ изменяется в диапазоне от $0,8 \pm 0,07$ до $6,1 \pm 0,6$ нм, а диаметр зерна уменьшается от 212 ± 17 до 39 ± 3 нм. Установлено, что при увеличении температуры подложки от 300 до 600 °С концентрация носителей заряда в пленках BaTiO₃ увеличивается в диапазоне $(1,85 \pm 0,16) \cdot 10^{13}$ – $(2,77 \pm 0,25) \cdot 10^{13}$ см⁻³, а подвижность носителей заряда снижается от $10,1 \pm 0,9$ до $7,2 \pm 0,6$ см²/(В·с). При этом состав поверхности пленок представлен элементами О, С, Ва. Установлено, что после двух циклов травления на глубине ~40 нм состав образцов приближается к характеристикам перовскита и соотносится как 1Ва/1Ti/3О.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке физических принципов создания элементной базы систем искусственного интеллекта для изготовления новых приборов и устройств нанoeлектроники, синаптроники и самоорганизующихся адаптивных нейроморфных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01276, <https://rscf.ru/project/23-79-01276/> в Южном федеральном университете (в части разработки методики и исследования влияния параметров отжига на параметры пленок ZnO), а также при финансовой поддержке Правительства РФ (соглашение № 075-15-2022-1123) (в части синтеза и исследования параметров пленок LiNbO₃ и BaTiO₃)

Литература

1. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation // Nano Research, 2023. P. 1–12.
2. Lobov S.A., Mikhaylov A.N., Shamshin M., Makarov V.A., Kazantsev V.B. Spatial properties of STDP in a self-learning spiking neural network enable controlling a mobile robot // Frontiers in neuroscience, 2020. Vol. 14. P. 88.
3. Telminov O., Gornev E. Possibilities and Limitations of Memristor Crossbars for Neuromorphic Computing // 2022 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). IEEE, 2022. P. 278–281.



УДК 621.38-022.532

ZnO мемристорные структуры: многоуровневое резистивное переключение и нейроморфные применения

Томинов Р. В., Варганов В. И., Угрюмов И. С., Вакулов З. Е., Казанцев В. Б., Смирнов В. А.

Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы» (НЕЙРОМЕНА), Южный федеральный университет, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
tominov@sfedu.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния управляющих параметров и атмосферного кислорода на многоуровневое резистивное переключение в ZnO мемристорных структурах.

Ключевые слова: нанотехнологии; нейроморфные системы; ReRAM; многоуровневое резистивное переключение; ZnO мемристорные структуры.

В настоящее время в научном сообществе наблюдается стремительный рост интереса к нейроморфным системам искусственного интеллекта, что объясняется их эффективностью в решении ряда задач, связанных с неструктурированными и неточно заданными условиями [1]. Однако изготовление нейроморфных систем на сегодняшний день затруднено из-за ряда проблем, например отсутствия систематических режимов исследования влияния управляющих параметров, а также влияния атмосферного кислорода на многоуровневое резистивное переключение в ZnO мемристорных структурах.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что увеличение амплитуды управляющего напряжения ($U_{ВАХ}$) от 1 до 4 В приводит к росту количества стабильных резистивных состояний (n) от 3 до 14, а увеличение тока ограничения ($I_{огр}$) от 10^{-6} до 10^{-3} А — от 5 до 15 соответственно. Показано, что в данном эксперименте ZnO мемристорные структуры демонстрируют максимальное количество стабильных резистивных состояний $n = 12$ при $U_{ВАХ} = 3$ В и $I_{огр} = 10^{-3}$ А. Также анализ результатов показал, что сопротивление структур за время 10^5 с при $P = 1,01 \cdot 10^5$ Па уменьшается в 2,52 раз, а при $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Па — в 1,17 раз.

Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении элементов ReRAM на основе ZnO мемристорных структур для нейроморфных систем искусственного интеллекта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-10272, <https://rscf.ru/project/23-79-10272> в Южном федеральном университете (в части исследования влияния управляющих параметров на многоуровневое резистивное переключение), а также при финансовой поддержке Правительства РФ (соглашение № 075-15-2022-1123) (в части исследования влияния атмосферного кислорода на многоуровневое резистивное переключение)

Литература

1. Щаников С. А., Лобов С. А., Михайлов А. Н., Казанцев В. Б., Макаров В. А. Нейроморфные системы на базе концепции многомерного мозга и мемристивных устройств // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 655–656.

УДК 621.382

Динамические мемристоры на основе сегнето- и антисегнетоэлектрических материаловХанас А. Р.¹, Hebert С.², Becerra L.², Сизых Н. А.¹, Жидков Н. С.¹, Jedrecy N.², Зенкевич А. В.¹

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khanas@phystech.edu

² Institut des Nano Sciences de Paris (INSP), CNRS UMR 7588, Sorbonne Université
75005, Франция, Париж, 4 Place Jussieu

Рассмотрены динамические мемристоры: мемристор 2-го порядка на основе $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, в котором синаптические функции реализованы при помощи динамики поляризации сегнетоэлектрика, и возможность использования антисегнетоэлектрика $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ для реализации нейронного мемристора.

Ключевые слова: мемристоры; сегнетоэлектрики; антисегнетоэлектрики; туннельные переходы.

Успех искусственных нейросетей (ИНС) сегодня неоспорим, однако он был достигнут в основном благодаря разработке алгоритмов и программного обеспечения. Одним из путей дальнейшего развития является разработка специализированного аппаратного обеспечения (АО), которое будет оптимизировано для работы ИНС, что должно улучшить их быстродействие и энергопотребление. В настоящее время среди различных подходов к разработке такого нейроморфного АО одним из наиболее многообещающих является подход на основе мемристоров. Мемристор — это двухполюсник, позволяющий эмулировать функциональность синапсов или нейронов. Синаптический мемристор — это, по сути, многоуровневая ячейка памяти, а нейронный мемристор — это активное устройство, которое должно состоять из порогового переключателя и емкости, чтобы иметь возможность генерировать импульсы (спайки) при приложении постоянного тока или напряжения. Предполагается, что схемы на основе мемристоров позволят существенно снизить энергопотребление и занимаемую площадь на чипе по сравнению с другими типами ускорителей ИНС и могут привести к созданию устройств с биореалистичной функциональностью, т.е. наиболее близких к работе мозга. На пути к этой цели в последние годы ученые стремятся реализовывать в мемристорах максимальное количество биологических функций, что привело к развитию концепций «динамических мемристоров» или «мемристоров высших порядков» [1].

В данном докладе рассматриваются динамические мемристоры, основанные на связанных с сегнетоэлектричеством (СЭ) эффектах. Во-первых, рассматривается синаптический мемристор второго порядка на основе мультиферритного туннельного перехода $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)/ BaTiO_3 (BTO)/LSMO (толщина BTO ~4 нм) [2]. Исследуется резистивное переключение и показывается, что оно разделяется на два типа: энергонезависимое, при окислении-восстановлении ионов Mn на границах раздела BTO/LSMO, и энергозависимое, из-за обратимого перемещения кислородных вакансий и динамики поляризации (P) BTO. Эффект



динамики P состоит в том, что при приложении $V > 0$ P поворачивается из стабильного состояния «вниз» (к нижнему электроду) в нестабильное состояние «вверх», которое с течением времени релаксирует обратно в стабильное состояние при $V = 0$. Это происходит из-за наличия встроенного электрического поля, за счет чего петля гистерезиса СЭ полностью сдвигается в область $V > 0$, и, таким образом, только направление P «вниз» стабильно при $V = 0$. При этом приложение $V < 0$ направления P не изменяет. Данная динамика, вследствие туннельного характера структуры, переносится и на сопротивление устройства, что позволяет реализовать множество синаптических эффектов: долговременное и кратковременное потенцирование/депрессию (LTP/LTD и STP/STD), усиление парных импульсов (PPF), пластичность, зависящую от частоты спайков (SRDP), и пластичность, зависящую от времени спайков (STDP).

Во-вторых, рассматривается применение антисегнетоэлектричества (АСЭ) для эмуляции нейронной активности. По сути, описанная выше смещенная P - V петля гистерезиса СЭ эквивалентна половине петли гистерезиса АСЭ. Следовательно, в АСЭ должна наблюдаться похожая динамика, причем обеих полярностей V , хотя и без долговременной памяти. Ранее было показано, что АСЭ туннельный переход (АСТП) на основе PbZrO_3 может работать как пороговый переключатель [3], что можно использовать для создания нейронных мемристоров. Недавно использование АСЭ конденсатора на основе $\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.8}\text{O}_2$, интегрированного с полевым транзистором, позволило реализовать искусственный нейрон [4]. Однако на сегодняшний день нейронный мемристор на основе АСТП еще продемонстрирован не был. В данном докладе предложено использовать АСЭ на основе $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ (HZO) в АСТП и показаны первые теоретические и экспериментальные результаты для устройств на основе ZrO_2 и HZO.

Литература

1. Kumar S. et al. // Nat. Rev. Mat., 2022. 7, 575.
2. Khanas A. et al. // Adv. Elect. Mat., 2022. 8, 2200421.
3. Apachitei G. et al. // Adv. Elect. Mat., 2017. 3, 1700126.
4. Cao R. et al. // Nat. Comm., 2022. 13, 7018.

УДК 681.51

Методы машинного обучения в управлении роботами со сложной локомоцией на основе обобщенной задачи динамического уравнивания

Горобцов А. С.^{1,2}, Орлова Ю. А.¹, Рыжов Е. Н.¹, Донская А. Р.¹¹ *Волгоградский государственный технический университет 400005, г. Волгоград, просп. Ленина, 28
vm@vstu.ru*² *ИМАШ им. А. А. Благодирова РАН
101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4
info@imash.ru*

Рассматривается управление антропоморфными и зооморфными роботами на основе обобщенной задачи динамического уравнивания с использованием численных моделей динамики. Показывается, что синтез управления при таком подходе сводится к задаче машинного обучения с меньшим числом параметров, чем при использовании существующих методов обучения, непосредственно интерполирующих функции управления.

Ключевые слова: машинное обучение; оптимальное управление; робототехника; шагающие роботы; экзоскелетоны.

Задачи оптимального управления занимают существенное место в машинном обучении. В некоторых случаях эффективным методом решения таких задач является метод обучения с подкреплением [1–5]. Метод используется в синтезе управления шагающими роботами [3–5]. Тем не менее задача остается актуальной. Обобщенная задача динамического уравнивания [6, 7] формулируется для систем, динамика которых описывается дифференциально-алгебраическими уравнениями и позволяет находить функции управления в форме множителей Лагранжа.

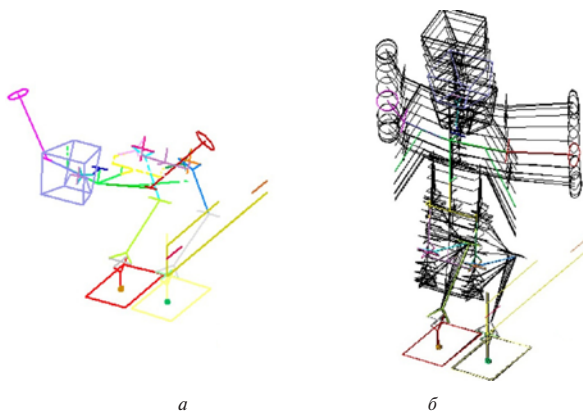


Рис. 1. Кинограммы управляемого движения робота при выполнении приседаний: а) без стабилизации — движение неустойчиво, б) со стабилизацией — движение устойчиво



На рис. 1 показаны примеры управляемого движения модели робота при выполнении приседания со стабилизацией и без нее. Представленный подход позволяет значительно сократить размерность пространства параметров искомых функций управления за счет использования уравнений динамики системы.

Литература

1. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement learning. The MIT Press Cambridge, 2020. 547 p.
2. Peters J., Schaal S. Reinforcement learning of motor skills with policy gradients // Neural networks, 2008. Vol. 21. № 4. P. 682–697.
3. Xie Z. et al. Feedback control for cassie with deep reinforcement learning // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018. P. 1241–1246.
4. Surana S., Lim B., Cully A. Efficient Learning of Locomotion Skills through the Discovery of Diverse Environmental Trajectory Generator Priors // 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2023. P. 12134–12141.
5. Bergamin K. et al. DReCon: data-driven responsive control of physics-based characters // ACM Transactions On Graphics (TOG), 2019. Vol. 38. № 6. P. 1–11.
6. Gorobtsov A. et al. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning // Sensors, 2022. Vol. 22. № 22. P. 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228920>.
7. Горобцов А. С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2023. — № 3 (756). — С. 14–24. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.

УДК 621.3.049

Обратный инжиниринг исследований и разработок в области автономных робототехнических систем

Дорофеев В. П.

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

vladislav.p.dorofeev@yandex.ru

В докладе представлен обратный инжиниринг научных исследований и разработок на примере работ команды CERBERUS, победившей в конкурсе DARPA Subterranean Challenge, и ведущих исследований в области робототехнических автономных систем с использованием объектно-процессной методологии (OPM, ISO 19450).

Ключевые слова: обратный инжиниринг; автономные робототехнические системы; автоматизация исследований; объектно-процессное моделирование.

В рамках «Котла идей» Национальной технологической инициативы раз в две недели проводится мониторинг последних достижений в области нейронаук и искусственного интеллекта. Обзор достижений в области искусственного интеллекта идет на основе баз данных препринтов: arxiv.org, techrxiv.org, а также мониторинга публикаций ключевых исследователей в области искусственного интеллекта через ресурс Google Scholar. Объемы новых публикаций по искусственному интеллекту на этих ресурсах — порядка 100 работ в день. Для предварительного выбора решений о публикациях разрабатывались инструменты на основе метаданных статей как в онлайн-режиме [1], так и в офлайн-режиме с предварительной полной выгрузкой новых публикаций в СУБД Postgresql [2].

Для накопления и систематизации знаний используется объектно-процессный метод (OPM) системного инжиниринга, расширенный методическим подходом к исполняемому интегративному моделированию (MAXIM) [3]. Он выбран из-за простоты, хорошей концептуальной проработки и примеров применения от моделирования биологических систем до космических миссий NASA. Для робототехнических систем он удобен тем, что дает возможность единого моделирования информационных и физических систем.

В качестве базы для проверки возможностей использования методов системного инжиниринга в области обратного инжиниринга автономных робототехнических систем выбрана система CERBERUS, победившая в организованном DARPA соревновании Subterranean Challenge [4]. Эта работа хорошо задокументирована в ряде публикаций, а ключевые программные решения по ней доступны с открытым кодом ([4] является системной статьей, в которой приведены ссылки на публикации и программный код).

Системный инжиниринг применяется следующим образом. Сначала на основе [Cerberus] создается системный проект решения. Далее проводятся сбор и анализ двух классов исследований: исследования, связанные с непосредственным развитием решения [4], и работы о последних достижениях в области искусственного интеллекта и робототехники, которые могут использоваться для развития решения.

По первому направлению рассматриваются работы, результаты которых использовались для проекта CERBERUS [4], — они помогают уточнить используемые



в системе решения, а также последующие, которые показывают направление развития решения [5]. По второму направлению выбраны две работы: программно-обзорная по созданию автономных систем машинного обучения [6] и по агенту, использующему большие языковые модели [7].

Возможное развитие системы на высоком уровне представлено на рис. 1 в виде объектно-процессной диаграммы. Объектно-процессное моделирование позволяет детализировать описание этой системы до уровня физической реализации и оперативно оценивать применимость новых результатов исследований для ее развития.

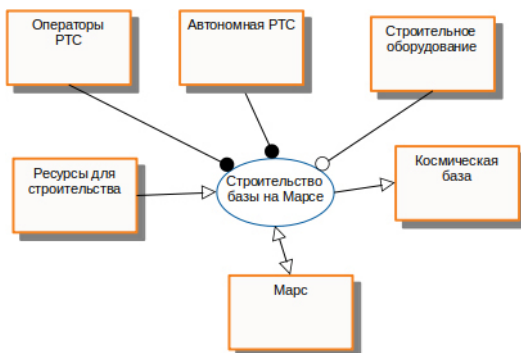


Рис. 1. Модель перспективного использования системы

Литература

1. Shakirov V. V. et al. Find a Needle in a Haystack-Sorting arXiv Articles by Your Criteria // *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV: Selected Papers from the XXII International Conference on Neuroinformatics*, October 12–16, 2020, Moscow, Russia. Springer International Publishing, 2021. P. 357–362.
2. Дорофеев В. П. Искусственный электроник-система сильного гибридного интеллекта для исследований в микроэлектронике // *Наноиндустрия*, 2021. — Т. 14. — № S7. — С. 648–649.
3. Dori D. Developing Industry 4 Systems with OPM ISO 19450 Augmented with MAX-IM // *Handbook of Model-Based Systems Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1–20.
4. Tranzatto M. et al. Cerberus: Autonomous legged and aerial robotic exploration in the tunnel and urban circuits of the darpa subterranean challenge // *arXiv preprint arXiv:2201.07067*, 2022.
5. Arm P. et al. Scientific exploration of challenging planetary analog environments with a team of legged robots // *Science robotics*, 2023. Vol. 8. № 80.
6. LeCun Y. A path towards autonomous machine intelligence version 0.9. 2, 2022-06-27 // *Open Review*, 2022. Vol. 62.
7. Di Palo N. et al. Towards a unified agent with foundation models // *Workshop on Reincarnating Reinforcement Learning at ICLR 2023*, 2023.

УДК 621.396:57.023

Алгоритмы и аппаратная реализация взаимодействия с живой тканью через мультиэлектродный массив**Тельминов О. А., к. т. н.***АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1**otelminov@niime.ru*

Работа посвящена изучению возможностей алгоритмов и аппаратной реализации двухстороннего общения с живой тканью с передачей сигналов через систему электродов.

Ключевые слова: нейронная сеть; нейрональная культура; генеративно-состязательные сети.

Взаимодействие с мозгом на программном и аппаратном уровне позволяет обеспечить интерфейс с информационно-управляющими и вычислительными системами. Такие киберфизические системы в перспективе способны дополнять мозг новыми возможностями, связанными с расширением его ресурсов, например увеличением объема памяти. С другой стороны, имеющийся функционал мозга может быть расширен в область несвойственного ему выполнения вычислительно сложных задач с помощью передовых микроэлектронных устройств [1].

Моделирование мозг-машинного взаимодействия может выполняться как на срезах мозга, так и на нейрональных культурах [2]. В таких диссоциированных культурах предварительно разрушаются нейронные связи, затем в течение 2–3 недель в клетках наблюдаются развитие спонтанной активности и синхронизация клеток. В настоящее время применение таких культур осуществляется для диагностики заболеваний, моделирования и изучения нейроразвития человека, анализа воздействия фармакологических средств с помощью химического управления, обучения поведения нейронной ткани с помощью электрического управления.

Коммуникация с живой тканью может осуществляться с помощью микроэлектродных массивов, на которых выращивается нейрональная культура. Каждый электрод позволяет как считывать электрический сигнал от совокупности нейронов культуры в его окрестности, так и передавать внешний электрический стимул на такую совокупность. В ряде случаев возможна и световая стимуляция нейронов. В пассивных системах производится лишь считывание сигналов от живой нейронной сети, в активных — выбор алгоритма для анализа входных сигналов, в том числе пачечной активности, выработка и подача стимулирующих сигналов для получения желаемого результата.

В работе выполнен анализ применяемых алгоритмических и аппаратных вариантов реализации сопряжения управляющих систем с нейрональной культурой. Произведена оценка применимости генеративно-состязательных сетей для анализа структуры сопряженной живой нейронной сети и выработки тактики взаимодействия с ней в целях получения требуемого результата. Автор считает, что такие анализ и оценка являются новыми результатами.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 434 с.
2. Bisio M., Pimashkin A., Buccelli S., Tessadori J., Semprini M., Levi T., Colombi I., Gladkov A., Mukhina I., Aversa A., Kazantsev V., Pasquale V., Chiappalone M. Closed-Loop Systems and In Vitro Neuronal Cultures: Overview and Applications // Adv. Neurobiol., 2019. 22:351-387.

УДК 53.087

Нейросетевой анализ обработки выходного сигнала акустических волн в датчиках жидкости**Воронова Н. В., к. ф.-м. н., Тельминов О. А., к. т. н.**
*АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1*
navoronova@niime.ru

В работе рассматриваются подходы применения нейросетевого анализа при проектировании датчиков жидкости с использованием нормальных акустических волн для анализа выходных сигналов и идентификации жидкости на их основе. Сравниваются два подхода: на основе классических алгоритмов и нейросетевой.

Ключевые слова: нейросетевой анализ; датчики жидкости; акустоэлектронные волны.

Одной из областей применения датчиков жидкости является идентификация жидких веществ по совокупности изменения физических величин на выходе. Такое распознавание бывает необходимым, когда требуется отличить одну жидкость от другой или определить ее соответствие заданному стандарту.

В ранее опубликованных статьях [1, 2] такая идентификация выполняется с использованием различных видов нормальных акустических волн. Подбор акустической волны с параметрами, отвечающими заданным требованиям, осуществляется эмпирическим путем с применением вспомогательных программ на основе классических алгоритмов. Результатом являются неточность расчетов параметров волны, сложность определения принадлежности ряда физических параметров определенной волне, а также длительное время подбора.

Основными задачами сенсора являются идентификация, классификация и каталогизация (эталон) жидкости. Задачи классификации и каталогизации сходные, однако классификация предполагает своим условием наличие критериев, а каталогизация предполагает своей целью полноту описания [3].

Рассматриваются подходы к построению многослойной нейросетевой модели для описания линейных процессов деформации упругих волн на основе экспериментальных данных, содержащих приближенно известные значения измерений физических показателей волны для различных типов жидкостных сред. Полученные модели используются для предсказания свойств образцов различных материалов по линейному отклику нормальной акустоэлектронной волны, основанному на методе приближения.

Приведены вычислительные эксперименты для нескольких типов образцов. В качестве эталона сравнения выбраны пять концентратов базовых вкусов (сладкого, соленого, кислого, горького, умами) [4].

В работе проведено исследование применения различных архитектур нейросетей к рассмотренным выше задачам, выполнен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью классических и нейросетевых методов.



Литература

1. Anisimkin V., Shamsutdinova E., Li P., Wang B., Zhu F., Quia Z., Kuznetsova I. Selective detection of liquid viscosity using acoustic plate waves with in-plane polarization // *Sensors*, 2022. Vol. 22. P. 2727–2737.
2. Voronova N. V., Anisimkin V. I. New modification of the acoustic Lamb waves and its application for liquid and ice sensing // *Ultrasonics*, 2021. Vol. 116 (221). 106496.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. // *Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 2. Вопросы метода и классификации* // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника.* — Москва, 2017. — С. 16–47.
4. Holmes V. Flavor. The science of our most neglected sense. Independent Publishers Since. W.W.Norton&Company // New York–London, 2022. 346.

УДК 004.81:621.373.1

Общая функциональная схема элемента колебательного типа для спайковых нейроморфных систем

Матюшкин И. В.^{1,2}, к. ф.-м. н.¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Спайковая нейронная сеть (СНС) рассматривается как коннектом параметризуемых осцилляторов. Дается абстрактная блок-схема элемента СНС. Спайковые импульсы есть возмущения первичного процесса, нелинейная динамика которого генерирует спайки на последующем периоде колебаний за счет фазовых переменных.

Ключевые слова: спайковые нейронные сети; коннекционизм; нелинейная динамика; функциональное пространство; мем-индуктивность.

Введение

Интерес к спайковым нейронным сетям в настоящее время [1–4] связан с их энергоэффективностью и возможностью улучшения информационной емкости сигнала за счет принципа кодирования задержек, а не порогов и весов, как в классическом случае. Наша работа вдохновлена абстракцией К-системы, а ее новизна следует из обобщенного понимания «сигнала» как единого процесса, растянутого на фиксированном отрезке времени. В архаической модели Ходжкина—Хаксли фазовой переменной является мембранный потенциал [1], а спайки на синапсах суммируются в виде заряда на некотором конденсаторе, который тут же быстро разряжается, что порождает обычно не очень резкий спайк на аксоне. Предлагаемые для элемента СНС схемотехнические решения основаны на комбинации резисторов или даже мемристоров, емкостей и источников ЭДС. Наше решение предполагает создание первичного колебательного контура с помощью внедрения в цепь индуктивности, а лучше мем-индуктивности. Элемент колебательного типа позволяет растягивать реакцию нейрона — нелинейной системы, описываемой несколькими фазовыми переменными на входящие спайки во времени в пределах одного периода колебаний. Таким образом, нейрон реализует алгебраическую операцию, заданную на множестве спайковых функций. т. е. спайки, распределенные на конечном отрезке времени, тоже порождают спайки, распределенные во времени. Задача разработчика состоит в подборе такой структуры элемента, которая сохраняла бы алгебраичность преобразования. Для разработчика спайковой нейроморфной системы возникают три подзадачи: 1 — обработка (накопление и пр.) возмущений на синапсах как значений фазовых переменных осциллятора; 2 — регенерация энергии в колебательном контуре; 3 — поддержка параметризации первичного контура за счет либо триггеров и других логических компонентов, либо мем-компонентов аналогового типа.

Спайковая функция и ее параметризация

Абстракцию сигнала в формализации К-системы [2], который представляет собой нагрузку ребер коннектома К-системы, мы представляем в виде элемента множества спайковых функций, заданных на отрезке $f \equiv f(t) \in Spk \quad t \in [0, T]$.

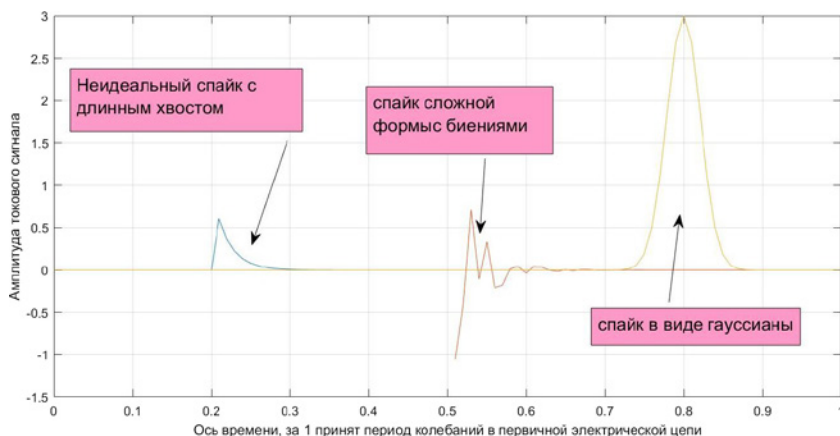


Рис. 1. Спайковая функция с тремя спайками

Физическая структура нейрона (рис. 2) должна поддерживать спайковое поведение, а значит, содержать нелинейные элементы функциональной электроники, обеспечивающие задержку между входом и выходом.

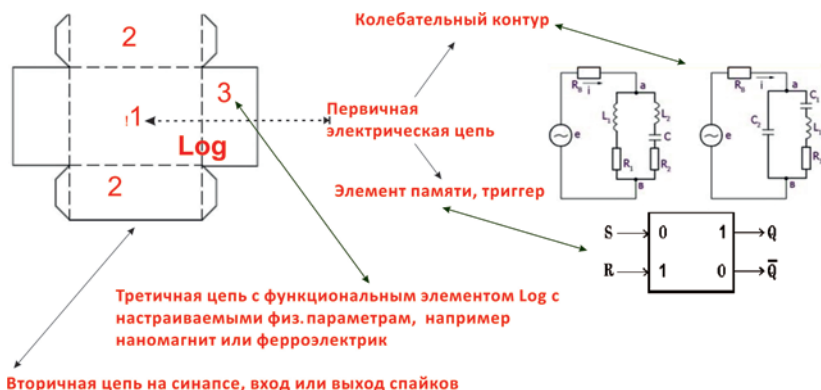


Рис. 2. Абстрактная структурно-функциональная схема нейрона СНС

Разделение нейрона на три блока (цепи) отражает сформулированные подзадачи. Геометрически первичная цепь представлена планарной структурой OXY (несколько слоев топологии СБИС), а третичная цепь сосредоточена по оси OZ. Разумеется, все три цепи электрически связаны не только в пределах нейрона.

Заключение

Предлагаемый подход обладает внутренней красотой, однако существенно усложняет структуру нейрона, как и его поведение, позволяя достичь большей информационной емкости сигнала, но при проигрыше в тепловыделении внутри нейрона.

Само понятие спайка требует от схемотехники СБИС активного внедрения индуктивностей.

Литература

1. Дмитричев А. С., Касаткин Д. В., Клиньшов В. В. и др. Нелинейные динамические модели нейронов: Обзор // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 2018. — Т. 26. — № 4. — С. 5–58.
2. Матюшкин И. В., Тельминов О. А. Формально-философские вопросы коннекционизма и актуальные проблемы разработки нейроморфных систем // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2022. — № 2 (185). — С. 49–59.
3. Makarov V., Lobov S., Shchanikov S., Mikhaylov A., Kazantsev V. Toward Reflective Spiking Neural Networks Exploiting Memristive Devices // Frontiers in Computational Neuroscience, 2022. Vol. 16. 859874. 10.3389/fncom.2022.859874.
4. Бахшиев А. В., Демчева А. А. Сегментная спайковая модель нейрона CSNM // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 2022. — Т. 30. — № 3. — С. 299–310.



УДК 004.942

Методы машинного обучения для задач разработки элементной базы

Жевненко Д. А.¹, Мещанинов Ф. П.¹, Кожевников В. С.¹, Кузнецов С. Е.¹,
Магомедрасулов А. М.², Харченко Е. Л.¹, Чернова А. С.^{1,2},
Горнев Е. С.^{1,2}, чл.-корр. РАН, д. т. н.

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе представлен обзор основных подходов к использованию машинного обучения в задачах разработки и исследования материалов, устройств элементной базы и интегральных схем. В работу включены собственные методы анализа элементной базы для решения актуальных задач кластеризации, предсказания состояния и свойств устройств.

Ключевые слова: машинное обучение; временные ряды; элементная база.

Введение

Разработка микроэлектронных изделий предполагает решение задач оптимизации, для которых возможно использовать машинное обучение [1, 2]. Методы данной группы в основном используются для преодоления ограничений классических моделей и позволяют достичь наилучшего баланса между точностью и скоростью работы, однако с развитием моделей машинного обучения возникли методы, способные выполнять классические инженерные задачи, связанные с мониторингом состояния и тестирования как устройств, так и промышленных систем.

В данной работе выполнен обзор методов машинного обучения, применяемых для разработки и исследования отдельных структур, элементной базы и интегральных схем целиком. Например, в работах [3, 4] рассматривается применимость классических моделей машинного обучения (ML) и глубокого обучения (ANN) для предсказания геометрии напыления последовательных металлических слоев на основе табличных данных. В работе [5] предложен метод моделирования свойств материалов, основанный на кодировании цепей полимеров и использовании коэффициента Фурье электронной плотности заряда материала из теории функционала плотности (ТФП) на основе ядерной гребневой регрессии. Работа [6] может послужить примером оценки точек с узким окном процесса (hot spot) в литографии для оптимизации коррекции эффектов оптической близости (ОРС). Оптимизация может выполняться на уровне замещения ПО для моделирования. В частности, в работах [7, 8] рассматриваются подходы к замене SPICE-симулятора нейронной сетью, обученной с использованием обучения с подкреплением. Помимо непосредственного решателя, сложные уравнения могут заменяться нейросетью для сокращения времени расчета с допустимой погрешностью вычислений: например, в [9] выполняется замена гидродинамического уравнения для моделирования характеристик микроволновой монолитной интегральной схемы (МИС) на трехслойный перцептрон.

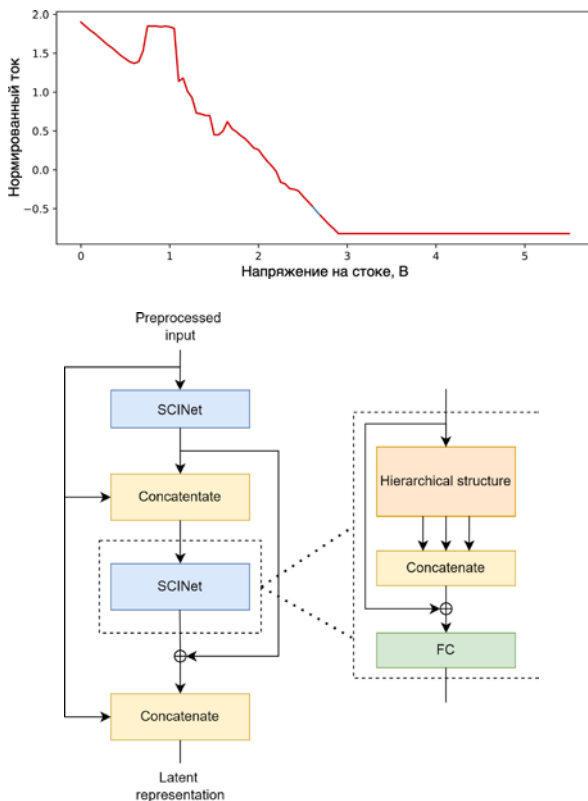


Рис. 1. Пример решения задачи автоматического контроля аномалий состояния электрофизических параметров КНИ-транзистора с проектной нормой 180 нм и разработанной схемы нейросетевой архитектуры

Помимо обзора, в работе представлены собственные подходы к решению задач автоматического контроля аномальности электрофизических параметров состояния транзистора (рис. 1), разработки новых нейросетевых архитектур, адаптированных для исследования временных рядов в микроэлектронике, и решение задач предсказания состояния одиночных устройств элементной базы. Выполненный обзор демонстрирует высокую эффективность методов машинного обучения в решении актуальных задач микроэлектроники.

Литература

1. Huang G. et al. Machine Learning for Electronic Design Automation: A Survey // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 2021. № 5. Vol. 26. P. 1–46.



2. Rapp M. et al. MLCAD: A Survey of Research in Machine Learning for CAD Key-note Paper // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022. № 10. Vol. 41. P. 3162–3181.
3. Zhang M. et al. High cycle fatigue life prediction of laser additive manufactured stainless steel: A machine learning approach // International Journal of Fatigue, 2019. Vol. 128. P. 105194.
4. Lee S. et al. Data analytics approach for melt-pool geometries in metal additive manufacturing // Science and Technology of Advanced Materials, 2019. № 1. Vol. 20. P. 972–978.
5. Pilania G. et al. Accelerating materials property predictions using machine learning // Scientific Reports, 2013. № 1. Vol. 3. P. 2810.
6. Zhang W. et al. A Workflow of Hotspot Prediction based on Semi-Supervised Machine Learning Methodology // Foshan, China: IEEE, 2021. P. 1–3.
7. Wang H. et al. Learning to Design Circuits // arXiv preprint arXiv:1812.02734. 2018.
8. Settaluri K. et al. AutoCkt: Deep Reinforcement Learning of Analog Circuit Designs // Grenoble, France: IEEE, 2020. P. 490–495.
9. Goasguen S., Hammadi S. M., El-Ghazaly S. M. A global modeling approach using artificial neural network Anaheim // CA, USA: IEEE, 1999. P. 153–156.

УДК 535.8

Разработка источников одиночных фотонов для систем квантового распределения ключей

Торопов А. А., Малеев Н. А., Сорокин С. В., Седова И. В., Рахлин М. В., Галимов А. И., Серов Ю. М., Васильев А. П., Кузменков А. Г., Бобров М. А., Кулагина М. М., Задиранов Ю. М., Трошков С. И., Шубина Т. В.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
toropov@beam.ioffe.ru

Разработана технология изготовления цилиндрических наноколонн с квантовыми точками $\text{InAs}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,53}\text{As}$, реализующих функцию наноантенн, собирающих и выводящих излучение квантовых точек. В спектрах фотолюминесценции наноколонн с диаметром ~ 300 нм обнаружены узкие линии излучения одиночных квантовых точек с длиной волны, соответствующей телекоммуникационному С-диапазону.

Ключевые слова: источники одиночных фотонов; квантовые точки; молекулярно-пучковая эпитаксия; квантовая криптография.

Введение

Использование источников одиночных фотонов (ИОФ) на основе полупроводниковых квантовых точек является одним из наиболее перспективных подходов к реализации устройств оптической квантовой связи [1]. Тем не менее активное внедрение подобных устройств при разработке квантовых систем защищенной связи и распределенных вычислений сдерживается отсутствием достаточно эффективных ИОФ, излучающих в телекоммуникационных спектральных диапазонах, используемых в оптоволоконных линиях связи: О-диапазоне (1260–1360 нм) и С-диапазоне (1530–1565 нм) [2]. В течение последних лет в ФТИ им. А. Ф. Иоффе активно разрабатывалась технология изготовления ИОФ на базе фотонных наноантенн с одиночными КТ в системе $\text{InAs}/\text{InGaAs}$, излучающих в О-диапазоне со средней частотой более 10 МГц [3]. В настоящей работе представлены результаты разработки технологии изготовления гетероструктур с квантовыми точками и наноантенн на их основе, предназначенных для ИОФ наиболее перспективного телекоммуникационного С-диапазона, работающих в системах квантового распределения ключей. Работа выполнена по заказу ОАО «РЖД».

Наноантенны с одиночными квантовыми точками $\text{InAs}/\text{InAlGaAs}$

Гетероструктуры с квантовыми точками изготавливались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках фосфида индия. Гетероструктуры представляли собой последовательность слоев тройного ($\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$) и четверного ($\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,53}\text{As}$) твердых растворов изорешеточных с InP -подложкой. Поверх буферного слоя $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ выращивался слой $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,53}\text{As}$, внутри которого методом Странского—Крастанова формировался слой InAs квантовых точек. Сверху выращивался слой $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ с толщиной, варьирующейся в разных образцах от 200 до 350 нм. На основе выращенных гетероструктур методом фотоэпитаксии и реактивного ионного травления изготавливался массив цилиндрических наноколонн, реализующих функцию наноантенн (типичное изображение отдельной

нанокolonны приведено на вставке к рис. 1). Диаметр различных нанокolonн на высоте нахождения слоя квантовых точек варьировался от 250 до 500 нм.

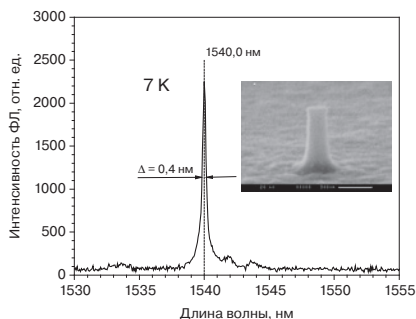


Рис. 1. Спектр излучения нанoантенны с oдиoнoчной квантoвой тoчкой $\text{InAs}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,53}\text{As}$. На вставке приведено типичное изображение нанoантенны, полученное в растрoвoм элeктроннoм микрoскoпе

Спектр излучения отдельных нанoантенн, измеренный при криoгенных температурах с использованием спектроскопии микрoфoтoлуминесценции [3], представляет собой набор спектpально-узких линий, относящихся к излучению небольшого числа отдельных квантoвых тoчек, случайным образом расположенных в пределах нанoантенны. В нанoкoлоннах с наименьшим диаметром, т.е. с наименьшим числом включенных квантoвых тoчек, линии излучения различных квантoвых тoчек, наблюдаемые в пределах спектpального С-диапазона, фактически не перекрываются друг с другом. Область спектра излучения такой нанoантенны, включающая линию излучения oднoй квантoвой тoчки, показана на рис. 1. Малая спектpальная ширина зарегистрированной линии (0,4 нм) подтверждает наблюдение фoтoлуминесценции oдиoнoчного квантoвого излучателя. Для подтверждения oжидаемого oднoфoтoнного характера излучения в ближайшее время планируется проведение корреляционных измерений фoтoнной статистики.

Зaключение

Изготовленные нанoкoлонны с квантoвыми тoчками $\text{InAs}/\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,37}\text{In}_{0,53}\text{As}$, выполняющие функцию фoтoнных нанoантенн, позволяющие выделять и регистрировать спектpально-узкие линии излучения oдиoнoчных квантoвых тoчек в пределах телекоммуникационного С-диапазона, что является важнейшей предпoсылкoй получения ИОФ для oптoволоконных систем квантoвого распределения ключей.

Литература

1. Couteau C., Barz S., Durt T. et al. Applications of single photons to quantum communication and computing // *Nature Rev. Phys.*, 2023. Vol. 5. P. 326–338.
2. Vajner D.A., Rickert L., Gao T., Kaymazlar K., Heindel T. Quantum communication using semiconductor quantum dots // *Adv. Quantum Technol.*, 2022. Vol. 5. № 7. P. 2100116.
3. Rakhlin M., Klimko G., Sorokin S., Kulagina M., Zadiranov Yu., Kazanov D., Shubina T., Ivanov S., Toropov A. Bright Single-Photon Sources for the Telecommunication O-Band Based on an InAs Quantum Dot with (In)GaAs Asymmetric Barriers in a Photonic Nanoantenna // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. P. 1562.

УДК 530.145

Квантовые коммуникации через атмосферные каналы связи

Кулик С. П.

*Центр квантовых технологий МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, ул. Колмогорова, 1*

В докладе рассмотрены основные проблемы и перспективы развития квантовых коммуникаций в атмосферных и спутниковых каналах связи:

- распределение квантовых ключей между мобильными и стационарными объектами;
- распределение ключей между низкоорбитальными спутниками и наземными объектами;
- распределение ключей между низко- и высокоорбитальными спутниками;
- создание глобальных квантовых сетей, охватывающих значительные территории.

Основной акцент сделан на отечественных открытых разработках по заказу ОАО «РЖД» в рамках реализации мероприятий «дорожной карты» развития высокотехнологического направления «Квантовые коммуникации».



УДК 004.056.55

Проблемы создания систем квантового распределения ключей для магистральных линий большой протяженности

Нефедов С. И., Ожегов Р. В., Евсютин О. О.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
snfedov@hse.ru, rozhegov@hse.ru, oevsyutin@hse.ru*

Рассмотрены проблемы создания систем квантового распределения ключей для магистральных линий большой протяженности. Приводятся результаты проектирования, макетирования и исследования аппаратуры, реализующей протокол квантового распределения ключей с фазово-временным кодированием.

Ключевые слова: квантовые коммуникации; квантовое распределение ключей; протокол квантового распределения ключей; LDPC-коды.

Система квантового распределения ключей является неотъемлемой частью аппаратуры квантовых коммуникаций и обеспечивает в общем случае формирование в режиме реального времени ключевой информации с заданной криптостойкостью. Особенностью таких систем является необходимость излучения и приема одиночных квантов света или излучения, близкого к ним по уровню. Только в этом случае будут достигаться условия для обеспечения формирования защищенного ключа и, как следствие, заданного уровня криптостойкости линии связи. В работе [1] приведен достаточно полный обзор современных технологий создания систем такого типа.

В ряде прикладных задач, связанных со строительством сложных сетей квантовой связи, требуется обеспечить высокие скорости генерации ключа, а также возможность обеспечения связи на линиях, достигающих нескольких сотен километров без применения специальной дублирующей аппаратуры. В этом случае возникает задача создания аппаратуры генерации квантового ключа для магистральных линий большой протяженности. Такая аппаратура строится по классической архитектуре системы, состоящей из излучателя квантов света (Алиса) и приемника квантов света (Боб). Передача квантов осуществляется по волоконно-оптической линии связи. Из-за большой дальности канала в системе возникают высокие затухания и требуется применение высокочувствительной (на уровне физического предела) аппаратуры приема одиночных квантов света, а также специальных схемотехнических решений, компенсирующих нестабильности в линии связи. В научном плане облик такой системы обоснован в работе [2]. Предлагаемый доклад посвящен техническим проблемам, возникающим при создании систем такого класса, и путям их решения.

В докладе приводятся результаты проектирования, макетирования и исследования аппаратуры, реализующей протокол и оптическую схему, предложенную в [2]. Рассматриваются требования к скорости генерации квантов света, необходимых для реализации заданных характеристик системы, даются оценки максимальной достижимой дальности передачи ключа при скорости 1 бит/с, анализируются требования к системе синхронизации, разрабатываются алгоритмы просеивания и укрепления ключа в процессе работы системы. Следует отметить, что требования

к аппаратуре системы находятся на грани уровня технологий наиболее передовой зарубежной элементной базы. С учетом ограничений на ее применение, возникших из-за санкционного давления на нашу страну, значительное внимание в работе уделяется анализу возможности применения в создаваемой системе квантового распределения ключей доступной элементной базы разработки РФ и КНР. В докладе приводятся результаты моделирования работы системы, а также результаты экспериментальной проверки работы системы созданной аппаратуры. Работа выполняется при поддержке ОАО «РЖД».

Способность системы квантового распределения ключей обеспечить работу на заданном расстоянии определяется выбранной оптической схемой и протоколом квантового распределения ключей. Возникновение ошибок передачи является неизбежным фактором в работе системы, поэтому протокол квантового распределения ключа включает этап исправления ошибок с использованием LDPC-кодов [3]. LDPC-кодом или же кодом с малой плотностью проверок на четность называется код, исправляющий ошибки, который характеризуется разреженной проверочной матрицей, используемой при декодировании. Применение LDPC-кода в протоколе квантового распределения ключей состоит в итеративной процедуре, включающей два этапа. На первом этапе Алиса и Боб вычисляют значения синдрома для своих версий просеянного ключа (корректного — у Алисы и содержащего ошибки — у Боба). Если синдромы не совпадают, то Боб пытается исправить ошибки в своей версии просеянного ключа, декодируя ее к известному ему ненулевому синдрому Алисы. Если исправление ошибок завершается неудачей, то Алиса раскрывает Бобу по открытому каналу часть битов просеянного ключа и попытка повторяется. В связи с тем что часть ключа становится известна злоумышленнику, за этапом очистки ключа следует этап усиления секретности, который сокращает длину результирующего секретного ключа на соответствующую величину. Эффективность процедуры очистки ключа зависит от исправляющей способности выбранного LDPC-кода. В разрабатываемой аппаратуре использованы матрицы из стандарта IEEE 802.11n [4].

Проведенные экспериментальные работы на макетах аппаратуры показали в качестве верхней границы работы системы дальность около 300 км при скорости генерации ключа 1 бит/с. С учетом применения в опытном образце создаваемой системы элементной базы разработки преимущественно КНР с несколько худшими характеристиками относительно отраслевых лидеров ожидается снижение дальности действия системы на 10–12%.

Литература

1. Xu F., Ma X., Zhang Q., Lo H.-K., Pan J.-W. Secure quantum key distribution with realistic devices // *Reviews of Modern Physics*, 2020. Vol. 92. P. 025002-1–025002-60.
2. Молотков С. Н. О стойкости систем квантовой криптографии с фазово-временным кодированием к атакам активного зондирования // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2020. — Т. 158. — № 6 (12). — С. 1011–1031.
3. Арбеков И. М. Элементарная квантовая криптография: для криптографов, не знакомых с квантовой механикой: Учебное пособие. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 168 с.
4. IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std.802.11n TM (2009).

УДК 621.3.049

Разработка методов совместной передачи квантовых и информационных каналов в одном оптическом волокне

Егоров В. И., Воронцова И. О., Гончаров Р. К., Тарабрина А. Д., Тупяков Д. В., Смирнов С. В., Чистяков В. В., Киселев Ф. Д.

Разработан метод совместной передачи квантовых и информационных каналов по одному оптическому волокну. Создан экспериментальный образец, передающий один квантовый и до 16 информационных каналов на расстояния до 51 км в стандартном одномодовом волокне.

В докладе представлены результаты проекта по разработке экспериментального образца системы квантового распределения ключа и передачи информации в одном волокне.

Рассмотрен мировой опыт по данной проблематике. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать скорость генерации квантового ключа и коэффициента квантовых ошибок для нескольких известных систем квантовой рассылки ключей (КРК).

Определены наиболее эффективные методы совмещения квантовых и информационных каналов в одном оптическом волокне: снижение мощности информационных каналов (в т.ч. использование усилителя на стороне получателя после сброса квантового канала), использование высококонтрастных узкополосных фильтров, перевод квантового канала на длину волны 1310 нм.

Создан экспериментальный образец комплекса, позволяющий распределять просеянные квантовые ключи со скоростью 5–9 кбит/с и QBER 3–5% на длине волны 1310 нм в присутствии 16 информационных каналов со скоростью 10 Гбит/с на канал в одном оптическом волокне SMF-28e на расстояние до 51 км.

Рассматриваются перспективы применения разработки для организации квантовозащищенных каналов связи между центрами обработки данных.

Работа выполнена по заказу ОАО «РЖД».

УДК 004.056.55

На пути к промышленной системе квантового распределения ключей с недоверенным центральным узлом**Шаховой Р. А.***ООО «КуРэйт»**143026, г. Одинцово, деревня Сколково, ул. Новая, 100*

В настоящее время много усилий направлено на повышение безопасности передаваемых данных. Одной из многообещающих технологий здесь является квантовое распределение ключей (КРК). Теоретически КРК позволяет распределять криптографические ключи с безусловной секретностью, которая гарантируется законами квантовой механики, однако из-за различных несовершенств оборудования, используемого для построения реальных систем КРК, появляются утечки, которые противник может использовать для того, чтобы скомпрометировать секретный ключ и получить несанкционированный доступ к зашифрованной информации. Наиболее уязвимой частью системы КРК является детектор одиночных фотонов (ДОФ), на который может быть направлено большое количество разнообразных атак. Наиболее эффективный способ нивелировать все эти атаки предлагает детектор-независимое КРК, в которой измерительное оборудование помещено в недоверенный центральный узел (НЦУ). Предлагаемый доклад посвящен обзору системы КРК НЦУ, которая разрабатывается в центре компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» при НИТУ МИСИС в рамках реализации мероприятий «дорожной карты» развития высокотехнологического направления «Квантовые коммуникации» по заказу ОАО «РЖД». В докладе будет рассмотрена концепция устройства, его отдельные узлы и их функциональность. Будут представлены теоретические выкладки и экспериментальные результаты, полученные при разработке данной системы.



УДК 004.056.55

Разработка и создание системы квантовой коммуникации на непрерывных переменных

Самсонов Э. О., к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник

ООО «СМАРТС-Кванттелеком»

Университет ИТМО

Докладывается о результатах выполнения научно-исследовательской работы «Разработка и создание системы квантовой коммуникации на непрерывных переменных» по заказу ОАО «РЖД». В рамках настоящей работы был создан экспериментальный образец первой в России системы квантовой коммуникации на непрерывных переменных (КРКНП) с гауссовым типом модуляции и обособленной стойкостью против атак коллективного типа с учетом эффектов ключа конечной длины.

Экспериментальный образец состоит из оптического модуля системы квантового распределения ключей на непрерывных переменных с гауссовой модуляцией; модуля контроля и управления для управления модулями отправителя и получателя; блока компенсации искажений; блока постобработки ключа; СКЗИ (МШ ТР-СКР, ООО «Системы практической безопасности»); защищенного интерфейса КРК/СКЗИ.

УДК 535.14

Коррелированные оптико-терагерцевые бифотоны: генерация и применение**Китаева Г. Х., Прудковский П. А., Кузнецов К. А., Леонтьев А. А., Сафроненков Д. А., Новикова Т. И.***Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2
gkitaeva@physics.msu.ru*

Рассмотрены условия генерации, детектирования и применения квантовых характеристик взаимно коррелированных фотонов оптических и терагерцевых частот. Исследованы подходы к безэталонной квантовой калибровке отклика терагерцевых детекторов на примере измерения квантовой эффективности сверхпроводникового терагерцевого болометра.

Ключевые слова: терагерц; оптико-терагерцевый бифотон; спонтанное параметрическое рассеяние; квантовая эффективность; сверхпроводниковый терагерцевый болометр.

Пары квантово-коррелированных фотонов, часто называемые *бифотонами*, генерируются при спонтанном параметрическом рассеянии света (СПР) в широком спектральном диапазоне вплоть до частоты оптической накачки нелинейной среды. Наиболее известными являются полностью оптические бифотоны, излучаемые на сравнимых частотах в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн. Начиная с первых прикладных работ по спектроскопии и квантовой фотометрии на основе СПР [1, 2] и по настоящее время оптические бифотоны широко используются в различных квантово-оптических технологиях, таких как квантовая коммуникация, вычисления, метрология, квантовая когерентная томография и построение изображений в фантомных лучах [3]. В последнее время начинают привлекать интерес также оптико-терагерцевые бифотоны, которые генерируются в сильно частотно-невырожденном режиме СПР и состоят из одного оптического фотона с частотой, близкой к частоте лазерной накачки, и одного терагерцевого фотона с частотой, примерно на два порядка меньшей [4]. Недавно были проведены первые исследования, нацеленные на распространение оптических квантовых технологий на терагерцевый диапазон. Возможное применение специфических квантовых свойств оптико-терагерцевых бифотонов изучалось применительно к задачам терагерцевой спектроскопии, зондирования и фотометрии [5–7]. Первые измерения корреляционных параметров оптико-терагерцевых полей, необходимые для реализации безэталонных измерений, были осуществлены в нашей работе [8]. Развитие безэталонной калибровки квантовой эффективности детекторов излучения терагерцевых частот может стать в будущем одним из самых востребованных и актуальных направлений, которое приведет к созданию методов измерения абсолютных величин спектральной чувствительности терагерцевых приемников без сравнения с заранее прокалиброванным референсным детектором и без использования эталонного источника терагерцевого излучения с известной спектральной яркостью. Мы исследуем условия применения идей безэталонной СПР-калибровки [9] на примере измерения токового отклика сверхпроводникового терагерцевого болометра [10].



Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00055

Литература

1. Клышко Д. Н. Фотоны и нелинейная оптика. — М.: Наука, 1980.
2. Клышко Д. Н., Пенин А. Н. Перспективы квантовой фотометрии // Успехи физических наук, 1987. — Т. 152 (4) — С. 653–665.
3. Cousteau C. Spontaneous parametric down-conversion // Contemporary physics, 2018. Vol. 59. P. 291–304.
4. Kitaeva G. Kh., Leontyev A. A., Prudkovskii P. A. Quantum correlation between optical and terahertz photons generated under multimode spontaneous parametric down-conversion // Physical Review A, 2020. Vol. 101. P. 053810.
5. Kitaeva G. K., Yakunin P. V., Kornienko V. V., Penin A. N. // Appl. Phys. B, 2014. Vol. 116. P. 929.
6. Kuznetsov K. A., Kitaeva G. Kh., Kovalev S. P., Germansky S. A., Buryakov A. M., Tuchak A. N., Penin A. N. // Appl. Phys. B, 2016. Vol. 122. P. 223.
7. Kutas M., Haase B., Klier J., Molter D., von Freymann G. Quantum-inspired terahertz spectroscopy with visible photons // Optica, 2021. Vol. 8 (4) P. 438–441.
8. Новикова Т. И., Леонтьев А. А., Китаева Г. Х. Измерение квантовой эффективности аналоговых детекторов в поле параметрического рассеяния света // Письма в ЖЭТФ, 2022 — Т. 116 — С. 343–349.
9. Леонтьев А. А., Кузнецов К. А., Прудковский П. А., Сафроненков Д. А., Китаева Г. Х. Прямое измерение корреляционной функции оптико-терагерцовых бифотонов // Письма в ЖЭТФ, 2021. — Т. 114. — С. 565–571.
10. Prudkovskii P., Leontyev A., Kuznetsov K., Kitaeva G. Towards measuring terahertz photon statistics by a superconducting bolometer // Sensors, 2021. Vol. 21. P. 4964.

УДК 535.14, 530.145

Практическая безопасность квантового распределения ключа при наличии побочных каналов утечки информации

Сыч Д. В.

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

denis.sych@gmail.com

Рассмотрены сценарии возникновения побочных каналов утечки информации в системах квантового распределения ключа и возможности их использования злоумышленником. Показано, что реалистичные побочные каналы могут привести к компрометации секретного ключа. Обсуждаются возможные контрмеры против уязвимостей такого типа.

Ключевые слова: квантовая коммуникация; квантовое распределение ключа; информационная безопасность; побочные каналы.

Введение

Квантовое распределение ключа (КРК) обеспечивает возможность гарантированно секретной коммуникации, основанной на фундаментальных законах квантовой физики. Однако практические реализации КРК в виде программно-аппаратного комплекса имеют ряд уязвимостей, связанных как с неточным соответствием конкретной инженерной реализации выбранному теоретическому протоколу, так и с неучтенными эффектами функционирования аппаратуры, приводящими к взлому системы КРК.

Уязвимости в операционной степени свободы

Первый тип уязвимостей (неточное соответствие протоколу) может быть напрямую интегрирован в доказательство безопасности КРК. Например, в протоколе BB84 для передачи информации должны использоваться однофотонные состояния света, однако на практике используются слабые когерентные состояния, в которых присутствуют многофотонные компоненты. Такое несоответствие открывает возможность для атак с разделением по числу фотонов: злоумышленник (Ева) определяет количество фотонов в импульсе, в случае одного фотона импульс блокируется, а в случае нескольких фотонов в импульсе один фотон злоумышленник оставляет себе, а остальные передает легитимному адресату (Бобу). Далее Ева проводит те же процедуры измерения и постобработки, что и Боб, и получает точную копию ключа. Подобные атаки могут быть учтены и нейтрализованы рядом контрмер, например дополнением протокола КРК методом decoy state.

Уязвимости в неоперационных степенях свободы: побочные каналы

Второй тип уязвимостей (неучтенные эффекты) более проблематичен. Дело в том, что в первом случае мы имеем дело с операционной степенью свободы, например энергией импульса, и неточность ее контроля остается в рамках модельного описания. Во втором же случае речь идет о заранее неизвестных эффектах в функционале аппаратуры вне операционной степени свободы и вне модельного описания — т. н. *побочных каналов*. Например, в протоколе BB84 Боб должен регистрировать импульсы света с помощью однофотонных детекторов. В рамках модельного описания однофотонный детектор поглощает импульсы света и выдает фотоотсчеты,

обработка статистики которых приводит к формированию секретного ключа. В реальности же поведение однофотонного детектора может быть иным: засветка детектора сильным (по сравнению с однофотонным уровнем) светом может имитировать его функционирование в однофотонном режиме, позволяя злоумышленнику получить полный контроль над регистрируемой Бобом фотостатистикой. Подобная уязвимость приводит к успешному взлому системы КРК [1].

Побочные каналы в источнике света

В настоящее время ведется работа по изучению уязвимостей на стороне передатчика информации (Алисы). А именно: мы рассматриваем возможные отклонения функционирования системы КРК от модельного описания на этапе приготовления квантовых состояний и оцениваем возможные побочные каналы. Например, четыре однофотонных состояния в протоколе BB84 могут отличаться не только по поляризации, но и по другим степеням свободы, в частности по времени. При таких условиях мы можем рассчитать верхние и нижние оценки на скорость генерации секретного ключа [2, 3].

Заключение

Уязвимости в виде побочных каналов могут привести к взлому системы КРК. Часть из этих уязвимостей на данный момент можно закрыть специальной модификацией программной или аппаратной частей системы КРК. Для обеспечения более полной информационной безопасности КРК целесообразны дальнейшая разработка контрмер против побочных каналов более общего вида и их практическое внедрение.

Литература

1. Lydersen L. et al. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination // Nat. Photonics, 2010. Vol. 4. P. 686–689.
2. Duplinskiy A. et al. Bounding passive light-source side channels in quantum key distribution via Hong-Ou-Mandel interference // Phys. Rev. A, 2021. Vol. 104. P. 012601.
3. Babukhin D. et al. Explicit attacks on the Bennett-Brassard 1984 protocol with partially distinguishable photons // Phys. Rev. A, 2022. Vol. 106. P. 042403.

УДК 004.056.55, 535.14

О методах оптимизации в моделях открытых квантовых систем для задач квантовых технологий**Печень А. Н.**¹ *Математический институт им. В. А. Стеклова Российской академии наук
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8*² *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
apechen@gmail.com***Ключевые слова:** открытые квантовые системы; квантовые каналы; оптимизация.

При анализе возможных действий злоумышленника в протоколах квантовой криптографии возникает задача оптимизации по семействам вполне положительных сохраняющих след отображений, моделирующих действия злоумышленника. В случае возможности применения злоумышленником неунитарных операций используемые для передачи информации квантовые системы становятся открытыми квантовыми системами. В данном докладе в общей постановке пойдет речь о разработанных и разрабатываемых нами методах решения различных оптимизационных задач для открытых квантовых систем и неунитарных операций, которые могут включать градиентные, стохастические методы, оптимизацию на многообразиях и т. д. [1–6].

Литература

1. Oza A., Pechen A., Dominy J., Beltrani V., Moore K., Rabitz H. Optimization search effort over the control landscapes for open quantum systems with Kraus-map evolution // *J. Phys. A*, 2009. 42, 205305.
2. Lokutsievskiy L. and Pechen A. Reachable sets for two-level open quantum systems driven by coherent and incoherent controls // *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2021. 54, 395304.
3. Morzhin O. V., Pechen A. N. Optimal state manipulation for a two-qubit system driven by coherent and incoherent controls // *Quantum Information Processing*, 2023. 22, 241.
4. Morzhin O. V., Pechen A. N. On optimization of coherent and incoherent controls for two-level quantum systems // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Matematicheskaya* (in press).
5. Petruhanov V. N., Pechen A. N. GRAPE optimization for open quantum systems with time-dependent decoherence rates driven by coherent and incoherent controls // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2023. 56, 305303.
6. Pechen A. N., Borisenok S., Fradkov A. L. Energy control in a quantum oscillator using coherent control and engineered environment // *Chaos, Solitons and Fractals*, 2022. 164, 112687.
7. Elovenkova M., Pechen A. Control landscape of measurement-assisted transition probability for a three-level quantum system with dynamical symmetry // *Quantum Reports*, 2023. 5, 526–545.



УДК Коды ББК: 22.314, 22.171

Уязвимость квантовой криптографии с фазово-временным кодированием в условиях затухания

Кронберг Д. А.

Математический институт им. В. А. Стеклова РАН

119991, г. Москва, ул. Губкина, 8

dmitry.kronberg@gmail.com

Рассматривается стойкость протокола квантовой криптографии с фазово-временным кодированием и строится явная атака, дающая противнику полную информацию о ключе. Описываются ошибки в доказательстве стойкости, делающие рассматриваемую атаку возможной.

Ключевые слова: квантовая криптография; квантовая информация; постселективные квантовые преобразования.

Квантовая криптография ставит своей целью распределение секретного ключа без вычислительных и технологических предположений о перехватчике. Важным преимуществом квантовой криптографии является возможность математического доказательства стойкости против всех возможных атак на состояния в рамках данной физической модели оборудования. Тем не менее доказательство стойкости является достаточно сложным теоретическим элементом протокола квантового распределения ключей (КРК).

В данной работе рассматривается протокол КРК с фазово-временным кодированием, использующий трехмерное пространство у отправителя и получателя, а также детектирование вмешательства противника по двум параметрам: битовой ошибке внутри базиса и контрольным временным отсчетам. Показывается, что доказательство стойкости для данного протокола КРК было проведено с ошибкой. Математически эта ошибка соответствует неверному выбору размерности пространства получающей стороны, а физически она соответствует тому, что были неверно рассмотрены атаки в условиях затухания в линии связи, при которых противник может блокировать некоторые посылки.

Построена явная атака, при которой противник блокирует четверть передаваемых однофотонных посылок, и для построенной атаки вычислена информация перехватчика. Показано, что атака демонстрирует критическую уязвимость протокола: возможны параметры атаки, при которых противник знает весь криптографический ключ, в то время как легитимные пользователи считают, что он полностью секретен. Также построена квантовая схема предлагаемой атаки.

Обсуждается адаптация атаки к реалистичным условиям работы протокола — ослабленным лазерным импульсам вместо однофотонного источника сигналов и использование метода обманных состояний с подходом Готтесмана — Ло — Люткенхауса — Прескилла для оценки доли ключа, соответствующей вкладу однофотонных посылок. Показывается, что в практических условиях протокол перестает быть стойким при любой величине затухания в линии связи, то есть при распределении ключей на любое ненулевое расстояние.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00086,
<https://rscf.ru/project/19-11-00086>*

Литература

1. Кронберг Д. А. // ТМФ, 2023. — 214 № 1. — С. 140–152.

УДК 004.716

Разработка методов развития магистральных и локальных квантовых сетей различных топологий на основе доверенных промежуточных узлов

Сантьев А. А.^{1,2}, Наливайко И. П.¹, Алексеев А. Л.¹¹ ООО «СМАРТС-Кванттелеком»199178, г. Санкт-Петербург, В.О., б линия, 59, корп. 1, лит. Б
a.santev@quanttelecom.ru² Национальный исследовательский университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49

Рассмотрены перспективы развития систем квантового распределения ключей для построения магистральных квантовых сетей смешанной топологии. Обсуждаются вопросы, связанные с модернизацией методов управления ключами в средствах криптографической защиты информации, распределяющих квантовозащищенные ключи. Предложены направления для модернизации инфраструктуры квантовых сетей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовые ключи; квантовозащищенные ключи; квантовая сеть.

Базовый способ формирования КЗК подразумевает передачу формируемого в одном из целевых узлов исходного секретного ключа SK (от англ. Secret Key) по цепочке промежуточных узлов с перешифрованием данного ключа на квантовых ключах смежных сегментов квантовой сети [1]. Основное отличие от ранее рассмотренного метода заключается в том, что в качестве КЗК берется не квантовый ключ сегмента квантовой сети, в состав которого входит один целевой узел, а ключ целевого узла, сформированный на расположенном в данном целевом узле центре выработки ключей [2]. Данный метод формирования КЗК впервые был практически реализован в рамках Европейской квантовой сети SECOQC [3].

Любой из способов формирования также можно объединить с альтернативной ключевой системой, например с доставкой предраспределенных симметричных ключей, или методами постквантовой криптографии. При формировании КЗК также может быть добавлено второе направление передачи ключей для защиты от навязывания ключа одним из целевых узлов. Кроме того, центральным источником распределяемого по сети секретного ключа может быть не только топологический узел, но и любой другой узел. Таким образом, можно реализовать топологию «звезда» или оптимизировать маршрут доставки SK до целевых узлов квантовой сети.

К одной из проблем в дальнейшем развитии квантовых сетей можно отнести необходимость разработки сервисной модели предоставления услуг, в том числе в части:

а) выработки порядка предоставления услуг по выдаче квантовозащищенных ключей или квантовозащищенной передаче данных потребителям, в том числе:

- формирование параметров оценки качества предоставления услуг (QoS),
- обеспечение биллинга предоставляемых услуг (биллинг ключей);



б) формирования сценариев сопряжения пользовательского оборудования и оборудования сетей КРК, в том числе:

- методы защиты «последней мили» (на предраспределенных симметричных ключах, с использованием постквантовой криптографии, с использованием клиентских модулей КРК);

в) обеспечения мультивендорности как на уровне пользовательского оборудования, так и на уровне оборудования сегментов сетей КРК;

г) учета опыта операторского взаимодействия потенциальных эксплуатантов сетей КРК.

Важной проблемой является отсутствие возможности централизованного контроля за жизненным циклом ключей в сети КРК (возможен контроль в СКЗИ-распределителях целевых узлов сетей КРК, отсутствие контроля после выдачи КЗК). Для решения проблемы необходимо обеспечивать:

- централизованное формирование ключевых серий КЗК (матриц парно-выборочных ключей) в отдельном устройстве («квантовом» HSM) с их дальнейшей рассылкой через сеть КРК;
- получение СКЗИ-потребителями получают не одного ключа для связи с парным СКЗИ, а набора парно-выборочных ключей с другими зарегистрированными СКЗИ-потребителями. Возможно централизованное управление статусом ключей (активация/деактивация) по ID ключей и ID устройств;
- исключение доступа ВСЕХ СКЗИ-распределителей к КЗК (ключам матрицы парно-выборочных ключей) в открытом виде, например формирование ключевого контейнера на предраспределенных ключах в «квантовом» HSM;
- обеспечение контроля повторяемости формируемых квантовой сетью КЗК.

Главный результат работы заключается в разработке методов применения ключей, формируемых квантовыми сетями смешанных топологий, в системах Интернета вещей для обеспечения защищенной передачи данных. Разработанные методы позволяют модернизировать подходы к построению квантовых сетей смешанных топологий и расширить сценарии их применения, а также представляют собой ценность в качестве возможных для практического применения квантово-стойких методов защиты каналов связи в системах Интернета вещей.

Литература

1. Scarani V. et al. The security of practical quantum key distribution // Rev. Mod. Phys. APS, 2009. Vol. 81. № 3. P. 1301.
2. Alléaume R. et al. Using quantum key distribution for cryptographic purposes: a survey.
3. Van Meter R. Quantum Networking // Quantum Networking, 2014. Vol. 9781848215. 1–333 p.

УДК 530.145

Квантовые алгоритмы для шумных кудитных процессоров промежуточного масштаба

Николаева А. С.^{1,2}, Киктенко Е. О.^{1,2}, Федоров А. К.^{1,2}¹ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Представляются результаты реализации квантовых алгоритмов с помощью многоуровневых квантовых систем — кудитов. Продемонстрированы возможности для сокращения числа операций при реализации квантовых алгоритмов при комбинации двух возможных подходов использования кудитов: во-первых, рассмотрения кудитов как набора кубитов, во-вторых, использование «дополнительных» уровней кудитов в качестве кубитов-анцилл. Обсуждаются экспериментальные результаты по реализации кудитных квантовых алгоритмов с использованием ионных процессоров.

Ключевые слова: квантовые вычисления; квантовые алгоритмы; кудиты.

Большинство существующих подходов к разработке цифровых (вентильных) квантовых процессоров подразумевают использование кубитов — двухуровневых квантовых систем. Такой подход выглядит естественным обобщением классической вычислительной парадигмы, использующей для кодирования информации двухуровневые величины (биты), на квантовых случаях.

Вместе с тем используемые физические носители информации при построении квантовых процессоров подразумевают возможность создания более сложных систем с большим количеством уровней (кудитов). Математически работа с кудитами полностью эквивалентна работе с кубитами. За последние несколько лет были продемонстрированы прототипы кудитных квантовых процессоров на основе ионов в ловушках [1, 2], фотоники [3] и сверхпроводниковых цепей [4].

В данной работе мы рассматриваем задачу реализации квантовых алгоритмов с помощью кудитов [5–9]. Исследуется вопрос об уменьшении количества элементарных квантовых операций и глубины схем реализации многокубитных квантовых вентилей при использовании кудитов.

Предлагаемый метод для реализации квантовых алгоритмов с использованием кудитов основан на сочетании нескольких подходов. Первый метод использует декомпозицию многоуровневых систем на совокупность двухуровневых систем [6–9]. Примером такого подхода является реализация ионного [2] и сверхпроводникового [4] квантовых процессоров, в которых кукварты рассматриваются как система из двух кубитов. В таком случае проведение однокудитного аналога двухкубитной операции внутри пространства кудита не требует физического взаимодействия между носителями информации, что позволяет достичь принципиально более высокой точности. Второй подход использует общую взаимосвязь между размерностью кудитов и их топологией связей, необходимую для масштабируемого многокудитного процессора, где более высокие уровни кудитов используются для замены вспомогательных кубитов [5, 8]. Обсуждается применение подхода в текущих экспериментах с ионными квантовыми процессорами [2, 9]. Такой подход



является особенно интересным для разложения многокубитных вентилей на наборы однокубитных и двухкубитных операций, в которых вместо отдельных физических кубитов-анцилл можно будет использовать дополнительные уровни кудитов. Данные подходы могут быть эффективным образом скомбинированы [9].

Благодаря использованию ионного квантового процессора [2] с рядом технических модификаций получены первые результаты реализации кудитных квантовых алгоритмов.

Использование кудитов позволяет значительно сократить число операций, которые требуются для реализации квантовых алгоритмов. Ввиду наличия шумов, ограничивающих точность реализации квантовых операций, такое сокращение может играть существенную роль для реализации квантовых алгоритмов. Следующим возможным направлением исследований является рассмотрение кудитов для реализации квантовых кодов коррекции ошибок.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты по развитию квантовых вычислений» (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021). Реализация квантовых алгоритмов выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-71-10092

Литература

1. Ringbauer M., Meth M., Postler L., Stricker R., Blatt R., Schindler P. and Monz T. A universal qudit quantum processor with trapped ions // *Nat. Phys.*, 2022. 18, 1053.
2. Aksenov M. A., Zalivako I. V., Semerikov I. A., Borisenko A. S., Semenin N. V., Sidorov P. L., Fedorov A. K., Khabarova K. Yu. and Kolachevsky N. N. Realizing quantum gates with optically-addressable 171Yb^+ ion qudits // *Physical Review A*, 2023. 107, 052612.
3. Chi Y., Huang J., Zhang Z., Mao J., Zhou Z., Chen X., Zhai C., Bao J., Dai T., Yuan H., Zhang M., Dai D., Tang B., Yang Y., Li Z., Ding Y., Oxenlowe L. K., Thompson M. G., O'Brien J. L., Li Y. et al. A programmable qudit-based quantum processor // *Nat. Commun.*, 2022. 13, 1166.
4. Seifert L. M., Li Z., Roy T., Schuster D. I., Chong F. T. and Baker J. M. Exploring quart computation on a transmon using optimal control. arXiv:2304.11159.
5. Kiktenko E. O., Nikolaeva A. S., Peng Xu, Shlyapnikov G. V. and Fedorov A. K. Scalable quantum computing with qudits on a graph // *Physical Review A*, 2020. 101, 022304.
6. Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O. and Fedorov A. K. Decomposing the generalized Toffoli gate with qutrits // *Physical Review A*, 2022. 105, 032621.
7. Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O. and Fedorov A. K. Generalized Toffoli gate decomposition using ququints: Towards realizing Grover's algorithm with qudits // *Entropy*, 2023. 25, 387.
8. Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O. and Fedorov A. K. Efficient realization of quantum algorithms with qudits. arXiv:2111.04384.
9. Nikolaeva A. S., Kiktenko E. O. and Fedorov A. K. Compiling quantum circuits with qubits embedded in trapped-ion qudits. arXiv:2302.02966.

УДК 530.145

Постселекция в открытых квантовых системах

Киктенко Е. О.^{1,2,3,4}

¹ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Математический институт им. В. А. Стеклова Российской академии наук
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8

⁴ Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН
108840, г. Москва, г. Троицк, а/я 30

Рассмотрено обобщение двухвекторного формализма на случай смешанных состояний и постселектирующих измерений, описываемых произвольными положительными операторнозначными мерами (ПОЗМ). За счет этого получено общее описание квантовых систем, включающее в себя стандартный формализм и двухвекторный формализм как частные предельные случаи. Рассмотрена экспериментальная возможность восстановления двунаправленных во времени кубитных состояний в протоколе квантовой телепортации.

Ключевые слова: двухвекторный формализм; квантовая томография; квантовая телепортация.

Постселекция играет важнейшую роль во всех основных областях квантовых информационных технологий, а именно квантовых вычислениях [1], квантовой коммуникации [2] и квантовой метрологии [3]. Одним из способов описания экспериментов с постселекцией является двухвекторный формализм [4], позволяющий ввести концепцию слабых значений [5]. Недавно было предложено обобщение двухвекторного формализма [6] на случай открытых систем и произвольных вариантов постселекции, описываемых произвольной положительной операторнозначной мерой (ПОЗМ). В основе этого обобщения лежит переход от описания квантовых состояний с помощью матриц плотности, соответствующих неотрицательным операторам, действующим на векторы гильбертова пространства состояний, к неотрицательным операторам, действующим на векторы квадрата гильбертова пространства состояний. Фактически это означает рассмотрение двусоставного состояния, первая часть которого описывает распространение квантовой информации от события приготовления вперед во времени, а вторая — распространение информации от события постселектирующего измерения назад во времени. Данное состояние, названное двунаправленным во времени состоянием, в общем случае может быть запутанным. В частном случае, когда постселектирующее измерение отсутствует, т. е. описывается ПОЗМ с единственным единичным элементом, двунаправленное во времени состояние факторизуется в обычное состояние, распространяющееся вперед во времени, и максимально смешанное состояние, распространяющееся обратно во времени.

Кубитные двунаправленные во времени состояния могут быть восстановлены экспериментально. Для этого были предложены две схемы: первая опирается на взаимонеобусловленные проективные измерения, по сути, представляющие проективные измерения кубитов в x -, y - и z -базисах, а вторая опирается



на симметричные информационно полные измерения с помощью ПОЗМ с четырьмя эффектами, соответствующими вершинам тетраэдра, вписанного в сферу Блоха. Построены квантовые цепочки для восстановления траектории распространения квантовой информации в протоколе квантовой телепортации, реализуемом при помощи квантовых процессоров на базе различных физических платформ. Разработанные схемы могут быть использованы для демонстрации влияния неидеальности выполнения квантовых операций на разрушение квантового состояния телепортируемого кубита, а также для бенчмаркинга квантовых процессоров.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты по развитию квантовых вычислений» (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021) и программы «Приоритет-2030» НИТУ «МИСИС» по проекту К1-2022-027

Литература

1. Harrow A. W., Hassidim A. and Lloyd S. Quantum Algorithm for Linear Systems of Equations // Phys. Rev. Lett., 2009. Vol. 103. P. 150502.
2. Vaidman L. Analysis of counterfactuality of counterfactual communication protocols // Phys. Rev. A, 2019. Vol. 99. P. 052127.
3. Arvidsson-Shukur D. R. M., Halpern N. Y., Lepage H. V. et al. Quantum advantage in postselected metrology // Nat. Commun., 2020. Vol. 11. P. 1–7.
4. Aharonov Y., Bergmann P. G. and Lebowitz J. L. Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement // Phys. Rev., 1964. Vol. 134. P. B1410.
5. Aharonov Y., Albert D. Z. and Vaidman L. How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100 // Phys. Rev. Lett., 1988. Vol. 60. P. 1351.
6. Kiktenko E. O. Exploring postselection-induced quantum phenomena with time-bidirectional state formalism // Phys. Rev. A, 2023. Vol. 107. P. 032419.

УДК 538.945

Управление трансмон-кубитами биполярными последовательностями одноквантовых импульсов**к. ф.-м. н. Бастрасова М. В.^{1,2}, Вожаков В. А.^{1,3}, д. ф.-м. н. Соловьев И. И.^{1,2,3}, д. т. н. Клёнов Н. В.^{1,2,4}**¹ ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

bastrakova@phys.unn.ru

² Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

³ Научно-исследовательский институт

ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ

119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Представлено нахождение оптимальной биполярной последовательности коротких импульсов напряжения, полученных при помощи устройств сверхпроводящей электроники, для реализации квантовых операций в трансмон-кубите с точностью >99,99 % (fidelity). Нахождение последовательности реализовано методом покоординатного спуска, генетическим алгоритмом и с помощью машинного обучения.

Ключевые слова: трансмон-кубит; сверхпроводниковая электроника; дискретная оптимизация.

Среди возможных реализаций кубита — базовой ячейки квантового процессора — одним из самых перспективных кандидатов является сверхпроводниковый кубит специального типа — трансмон, который лежит в основе квантовых процессоров Google, IBM, Rigetti. Для трансмонов разработаны протоколы управления посредством микроволнового поля, позволяющие совершать операции с достаточно высокой точностью [1]. Однако при масштабировании таких систем существует проблема, связанная с дополнительными каналами декогеренции за счет огромного числа электроники для индексного управления каждым кубитом в регистре. В связи с этим развиваются альтернативные подходы к управлению трансмонов. Одним из таких подходов является использование регулярных последовательностей управляющих импульсов с широким спектром — коротких (длительность ~ пс) униполярных импульсов (Single Flux Quantum, SFQ), генерируемых в цепях цифровой сверхпроводниковой электроники [2]. При этом период между импульсами соответствовал периоду собственных колебаний кубита (~200 пс), далее данный способ был модифицирован на случай нерегулярных последовательностей импульсов SCALLOP [3], когда был предложен алгоритм по подбору управляющей последовательности на частоте тактового генератора с периодом (~40 пс), при этом однокубитные операции ~10–20 нс.

В данной работе представлена схема цифрового управления на основе импульсов различной полярности и показана возможность ускорения операции до 6 нс. Для подбора последовательностей с заданными параметрами нами использованы



методы покоординатного спуска, генетического алгоритма и машинного обучения. Критерием оптимизации является точность операций $>99,99\%$ (fidelity).

Покоординатный спуск представляет собой процедуру постепенного изменения последовательности в лучшую по критерию оптимизации сторону, вдохновленную схожим методом SCALLOPS [3]. Минусом этого подхода является «жадность», т.е. он определяет наилучшую последовательность на каждом этапе, что сильно суживает пространство поиска: изменить его можно только выбором другой стартовой последовательности.

Генетический алгоритм ищет последовательности при помощи скрещивания (разделением двух последовательностей на две части и перекрестной «склеивкой» их между собой) и мутаций (случайным изменением одного символа). Показано, что эффективные последовательности при использовании генетического алгоритма находятся при выборе любой стартовой точки.

Используя машинное обучение для выбранной задачи на основе обучения нейросети AlphaZero [4], можно найти эффективные последовательности для любых входных параметров за достаточно небольшое время.

Таким образом, в работе приводится сравнение этих подходов и обсуждается возможность их применения для нахождения управляющего сигнала при совершении квантовых операций в кубитах с высокой точностью.

Литература

1. Krantz P., Kjaergaard M., Yan F., Orlando T. P., Gustavsson S., Oliver W. D. A quantum engineer's guide to superconducting qubits // *Phys. Rev. Applied*, 2019. Vol. 6. № 2. P. 021318.
2. McDermott R., Vavilov M. G. Accurate Qubit Control with Single Flux Quantum Pulses // *Phys. Rev. Applied*, 2014. Vol. 2. № 1. P. 01400.
3. Leonard E. Jr., Beck M. A., Nelson J., Christensen B. G., Thorbeck T., Howington C. Digital coherent control of a superconducting qubit // *Phys. Rev. Applied*, 2019. Vol. 11. № 1. P. 014009.
4. Dalgaard M., Motzoi F., Sørensen J. J., Sherson J. Global optimization of quantum dynamics with AlphaZero deep exploration // *npj Quantum Inf.*, 2020. Vol. 6. № 6.

УДК 621.382.2/3

Применение высокочастотных транзисторов в устройствах квантового распределения ключей

Попов В. Г.^{1,2,3}¹ *АО «ИнфоТеКС»**127287, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1*² *Отдел радиофотоники, НТЦ Телекоммуникаций,**Московского физико-технического института**141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*³ *Факультет информационных технологий и анализа больших данных,**Финансового университета при правительстве РФ**109456, г. Москва, 4-й Вешняковский проезд, 4*

В докладе рассматриваются устройства квантового распределения ключей и их параметры, отвечающие за такие характеристики, как дальность устойчивой работы и скорость выработки ключа шифрования. Для увеличения дальности предлагается схемотехническое решение модуля формирователя стробирующего импульса однофотонного детектора на основе высокочастотных гетеротранзисторов. Подобное решение может быть применено и для создания коротких лазерных импульсов, которые используются в устройствах квантового распределения ключей.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; однофотонный детектор; импульсный лазер; СВЧ-транзистор.

Бурное развитие информационных технологий выдвигает новые требования к компонентной базе современных компьютеров и к конфиденциальности цифровой информации. Развитие параллельных алгоритмов обработки информации привело к осознанию, что современные асимметричные методы шифрования информации при ее передаче уже являются уязвимыми, а с появлением квантовых компьютеров с числом кубитов больше нескольких тысяч эффективная мощность ключей шифрования или уровень секретности становится нулевым [1]. В связи с этим в 1984 году была предложена технология квантового распределения ключей [2]. Гарантией доверенной доставки ключа является тот факт, что информация кодируется в квантовых состояниях фотона, которые при внешнем воздействии могут измениться, что приведет к ошибкам при формировании симметричного ключа. При этом важно, чтобы количество фотонов в импульсах излучения было мало — не более 1. Для измерения таких малых мощностей используют однофотонные детекторы и технологию импульсной синхронизации таких детекторов с фотонными импульсами (здесь рассматриваются дискретные квантовые протоколы [2]). Параметры детекторов существенно влияют на скорость формирования или выработки квантового ключа, допустимые для надежной выработки дальность или затухание в канале связи. В частности, конечная дальность надежной выработки ключа зависит от темновых шумов однофотонного детектора. Очевидно, если темп темновых срабатываний детектора сравнится с темпом прихода фотонов, ожидать надежной выработки квантового ключа не придется. Темп же темновых срабатываний, в свою очередь, определяется временем активации детектора, то есть временем нахождения детектора в режиме однофотонной чувствительности. Чем дольше



однофотонный детектор находится в состоянии с высокой чувствительностью, тем выше вероятность его ложного или темнового срабатывания и тем выше темп темновых отчетов, а значит, и ниже допустимая дальность выработки квантового ключа [3]. Таким образом, задача уменьшения длительности активации однофотонных детекторов и соответствующих фотонных импульсов приобретает не только фундаментальный, но и прикладной интерес. На сегодняшний день длительность импульсов определяется как возможностью управляющей электроники, так и граничными частотами лазеров и однофотонных детекторов.

Необходимо отметить, что однофотонные детекторы имеют запаздывание при срабатывании, которое определяет их граничную частоту. Время запаздывания измерить точно достаточно проблематично, поскольку неизвестно время прихода фотона в детектор, поэтому экспериментально наблюдаются некоторые флуктуации задержки срабатывания детектора, исходя из средней величины которых можно определить среднее время срабатывания, а значит, и минимальную длительность импульса, подаваемого на детектор. Так, в обзоре [3] указано, что средняя длительность таких флуктуаций может достигать от 0,04 нс в случае датчика на основе сверхпроводниковых нанопроволок до 0,4 нс в случае лавинно-пролетного диода. Поскольку данные по лавино-пролетному диоду требуют корректировки с учетом долгого времени релаксации детектора, имеет смысл обратить внимание на сверхпроводниковый детектор. Время импульса в 40 пс на сегодняшний день является сложнодостижимым, поскольку требует высокой тактовой частоты порядка 20 ГГц. Цифровые схемы, работающие на таких частотах, на сегодняшний день не реализованы, по крайней мере коммерчески не доступны. В этой работе мы предлагаем формирователь импульсов такой длительности на основе СВЧ-транзистора и линий управляемой оптической задержки сигналов.

Литература

1. National Security Agency. National Policy on the Use of the Advanced Encryption Standard (AES) to Protect National Security Systems and National Security Information. NSA, Tech. Rep., 2003.
2. Pirandola S., Andersen U.L., Banchi L., Berta M., Bunandar D., Colbeck R., Englund D., Gehring T., Lupo C., Ottaviani C., Pereira J.L. et al. Advances in quantum cryptography // *Advances in Optics and Photonics*, 2020. P. 1012–1236. arXiv: 1906.01645.
3. Eisaman M. D. et al. Invited review article: Single-photon sources and detectors // *Review of scientific instruments*, 2011. 82 p. 071101.

УДК 004.056.55

Квантовая сеть МФТИ

Горина Е. В.¹, Криштоп В. Г.^{1,2,3}, Андреев С. Н.¹¹ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*² *ООО «Сейсмотроника»
111020, г. Москва, Юрьевский пер., 11*³ *Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
gorina.ev@mipt.ru*

Представлен проект квантовой сети МФТИ. Запланирован гибридный сценарий развития, где физтеховский квантовый сегмент стыкуется как с соседними вузами в структуре Межуниверситетской квантовой сети, так и с коммерческой квантовой инфраструктурой.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовая криптография; квантовые коммуникации; Межуниверситетская квантовая сеть (МУКС); VipNet Quantum Trust System (ViPNet QTS).

Проект Квантовой сети МФТИ принят к реализации. Первым шагом запланировано создание базового узла квантовой сети МФТИ в топологии «звезда» на три абонента на базе Infotecs ViPNet QTS [1]. В дальнейшем планируется расширение квантовой сети МФТИ и создание абонентских квантовых подсетей на базовых кафедрах. Также запланировано соединение квантовых сетей МФТИ и МГУ, и сразу же на этапе проектирования запланирована бесшовная интеграция квантовой сети МФТИ в Межуниверситетскую квантовую сеть (МУКС) [2]. В дальнейшем предусматривается подключение квантовой сети МФТИ к магистральным квантовым линиям РЖД и/или других операторов квантовых сетей.

Это гибридный сценарий развития, где университетский квантовый сегмент интегрируется не только с соседними сегментами МУКС, но и с окружающей коммерческой квантовой инфраструктурой, причем развитие Квантовой сети МФТИ способствует созданию окружающей квантовой экосистемы вне МУКС, на дружественных предприятиях и коммерческих партнерах, и активно интегрируется во внешние проекты.

Квантовая сеть МФТИ будет использоваться не только для защиты информации, но и в исследовательском режиме. На основе Квантовой сети МФТИ можно проводить обучение, научные работы, НИР, тестировать новое оборудование. В МФТИ разрабатывается образовательная программа по новым профстандартам, что будет способствовать разработке образовательного стандарта по квантовым коммуникациям.

Развитие Квантовой сети МФТИ будет способствовать решению ряда технических задач: увеличение дистанции распределения ключей, мультиплексирование систем КРК и систем передачи данных, мобильная квантово-защищенная связь, организация сетей конечного доступа (проблема «последней мили»). Планируется развитие атмосферного и космического квантового сегмента в сотрудничестве с Квантовым центром МГУ. В чуть более далекой перспективе — разработка

отечественной элементной базы для систем КРК, интегральная оптика для квантовых коммуникаций, собственные ПЛИС для КРК и высокопроизводительные процессоры.

Квантовая сеть МФТИ может обеспечить защищенный доступ к научным квантовым разработкам МФТИ — квантовые симуляторы, вычислители, квантовые стенды. В инфраструктуре учебно-исследовательской квантовой сети можно опробовать реальные сценарии использования квантовых технологий, промышленные пилоты, доводить до коммерческого применения проекты с крупными промышленными заказчиками, разрабатывать продукты и технологии для развития квантовой инфраструктуры.

УДК 530.145

Информационный подход к исследованию адекватности, полноты и точности квантовых измерений в приложении к квантовым вычислениям и коммуникациям**Богданов Ю. И.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2}, Лукичёв В. Ф.¹**¹ *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

В докладе представлено исследование, направленное на разработку методов прецизионной реконструкции квантовых состояний в условиях существенного влияния декогерентизации и квантовых шумов. Представлены примеры разработанного подхода в приложении к квантовым информационным алгоритмам.

Ключевые слова: кубиты; квантовые измерения; декогерентизация; алгоритм сверхплотного кодирования.

В докладе представлен общий подход к оценке квантовых информационных технологий с помощью измерений. Рассмотрен мониторинг количества информации о квантовых состояниях и квантовых процессах, включая потерю информации, вызванную воздействием квантовых шумов. Разработанные методы применяются к исследованию влияния квантовых шумов на качество реализации алгоритма сверхплотного кодирования, играющего важную роль в задачах квантовых вычислений и коммуникаций. С использованием методов, развитых в нашей работе [1], в настоящем исследовании показано, что применение зашумленных состояний Белла и соответствующих зашумленных алгоритмов может приводить к существенным ошибкам при преобразованиях квантовой информации.

Результаты исследования имеют практическое значение для обеспечения качества и эффективности квантовых информационных технологий.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00263
«Оценка точности и прогнозирование эффективности квантовых информационных технологий на основе зашумленных оптических систем высокой размерности»*

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Фастовец Д. В., Лукичёв В. Ф. Решение уравнения Шредингера на квантовом компьютере методом Залки — Визнера с учетом квантовых шумов // Письма в ЖЭТФ, 2021. — Т. 114. — Вып. 6. — С. 391–399.



УДК 530.145

Бенчмаркинг симуляторов квантовых компьютеров

Бантыш Б. И.^{1,2}, Чернявский А. Ю.^{1,2}

¹ *Российский квантовый центр*

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН*

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

В работе рассмотрена задача тестирования симуляторов квантовых компьютеров на предмет соответствия реальным физическим устройствам. Предложен консервативный подход к оценке способности симулятора предсказывать статистические данные квантового устройства для различного числа кубитов. Предложенная методика тестирования была апробирована на примере нескольких симуляторов однокубитного квантового процессора и статистических данных, полученных с реального квантового устройства.

Ключевые слова: квантовые вычисления; симуляция квантового компьютера; квантовые шумы.

При реалистичном анализе квантовых алгоритмов необходимо прибегать к использованию симуляторов квантовых компьютеров. Учет различного рода ошибок в них может выполняться на принципиально разных уровнях. Использование полуаналитического подхода, основанного на перемножении значений точности различных преобразований, позволяет добиваться моделирования систем достаточно высокой размерности и в том числе анализировать коды коррекции ошибок. Использование стохастических симуляторов на уровне векторов-состояний позволяет выполнять более детальный учет ошибок для размерностей квантового регистра более 30 кубитов. Переход к формализму матрицы плотности и решения уравнения Горини — Коссаковского — Сударшана — Линдблада несколько расширяет спектр возможностей симулятора ценой уменьшения числа симулируемых кубитов. Наконец, низкоуровневые симуляторы, учитывающие индивидуальные особенности физических систем, способны давать наиболее полное описание эволюции квантового регистра, но зачастую ограничены сравнительно небольшими размерностями. Выбор параметров таких моделей также остается нетривиальной задачей.

Несмотря на то что на данный момент существует довольно большое число реализаций зашумленных квантовых симуляторов (включая симуляторы на базе популярных программных библиотек Qiskit, Cirq и т. п.), вопрос выбора подходящих моделей шума для конкретного квантового устройства остается открытым. Более того, для квантового устройства с ярко выраженными немарковскими процессами такие модели могут быть в принципе непригодны.

Настоящая статья посвящена разработке набора тестов, которые позволят оценить, насколько хорошо тот или иной квантовый симулятор описывает реальное квантовое устройство. Показано, что использование стандартных статистических тестов оказывается непригодным для данной задачи либо с точки зрения сложности вычислений, либо с точки зрения исходной постановки задачи. Кроме того, предложен новый критерий, который, с одной стороны, является консервативным, требуя высокой точности симуляции на широком наборе квантовых схем,

а с другой стороны, достаточно прост для расчета. Данный критерий применен для анализа однокубитного симулятора реального физического устройства с применением моделей различного уровня.

*Работа выполнена в рамках «Дорожной карты по развитию квантовых вычислений»
(контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021)*

УДК 530.145

Энтропийное свойство алгоритма QAOA со случайным выбором параметров

Чернявский А. Ю.^{1,2}, Бантыш Б. И.^{1,2}

¹ *Российский квантовый центр*

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН*

117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

В работе представлен анализ алгоритма QAOA (quantum approximate optimization algorithm) со случайным выбором параметров квантовой схемы. Получено, что в среднем такой подход дает превосходство над классическим перебором на невзвешенных задачах QUSO (quadratic unconstrained spin optimization), включая задачи Max-Cut. Экспериментально показано, что в основе превосходства лежит эффект увеличения энтропии вероятностей получения различных значений целевой функции.

Ключевые слова: квантовые алгоритмы; алгоритмы оптимизации; QAOA; энтропия.

Квантовый алгоритм приближенной оптимизации QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm), представленный в работе [1], является одним из наиболее перспективных квантовых алгоритмов эпохи NISQ (noisy intermediate-scale quantum). В оригинальной работе основной подход к выбору параметров квантовой схемы был основан на эффективном классическом расчете среднего значения целевой функции задачи Max-Cut на графах определенной структуры. Позже наибольшую популярность приобрел подход квантово-классической оптимизации [2], когда приближенное вычисление среднего значения целевой функции производится с использованием квантового вычислителя, в последние годы также исследуется возможность использования фиксированных или близких параметров для широких классов задач [3]. В данной же статье рассмотрена работа алгоритма QAOA со случайным выбором параметров квантовой схемы (random parameters QAOA, грQAOA).

Были рассмотрены все возможные невзвешенные задачи Max-Cut размера от 5 до 9, а также случайные невзвешенные задачи QUSO (quadratic unconstrained spin optimization) размера от 10 до 20. В ходе численных экспериментов было получено, что для большинства таких задач грQAOA дает большую вероятность получения правильного ответа, нежели классический перебор. Дальнейшее исследование данного эффекта показало, что в его основе лежит энтропийное свойство грQAOA: энтропия Шеннона распределения вероятностей значений целевой функции при измерении выходного состояния грQAOA всегда выше, нежели для классического случайного выбора входного битстринга. Данное свойство было проверено для всех рассматриваемых задач.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты по развитию квантовых вычислений» (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021)

Литература

1. Farhi E., Goldstone J. and Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm // arXiv preprint, 2018. arXiv:1411.4028.
2. Fernández-Pendás M., Combarro E. F., Vallecorsa S. et al. A study of the performance of classical minimizers in the quantum approximate optimization algorithm // *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2022. Vol. 404. P. 113388.
3. Brandao F. G., Broughton M., Farhi E. et al. For fixed control parameters the quantum approximate optimization algorithm's objective function value concentrates for typical instances // arXiv preprint, 2018. arXiv:1812.04170.



УДК 538.91

Квантовые модели навигации птиц с учетом декогерентизации и шумов

Богданова Н. А.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Чернявский А. Ю.¹, Лукичев В. Ф.¹

¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Птицы и некоторые другие животные обладают физиологическим магнитным компасом, позволяющим им делать правильный выбор направления во время длительной миграции. Предполагается, что механизм магнитной ориентации и магниторецепции использует индуцированную светом радикальную парную реакцию, включающую когерентную эволюцию спинов двух электронов, в качестве основы датчика магнитного компаса. С использованием методов, развитых в наших работах [6, 7], в настоящем исследовании мы разрабатываем квантовые модели магниторецепции. Предложенные методы основаны на анализе эффектов интерференции, когерентности и запутанности в открытых квантовых системах, подверженных действию квантовых шумов.

Ключевые слова: магниторецепция; квантовая когерентность; квантовая запутанность; декогерентизация; механизм радикальных пар.

Введение

Исследования ряда научных групп последних десятилетий [1, 2] показывают, что квантовые эффекты, управляющие микромиром, играют решающую роль также и в макромире, в том числе в органических (биологических) системах. Многие специалисты считают, что это многообещающая область исследований, которая может привести к большим достижениям в будущем. На наших глазах формируется новая научная дисциплина — квантовая биология.

Квантовые модели магниторецепции в биосистемах с учетом декогерентизации и шумов

Одной из самых дискуссионных тем квантовой биологии является механизм магниторецепции птиц — способность некоторых видов ориентироваться по магнитному полю Земли [3]. Для интерпретации этого явления предполагается, что магниторецепция у птиц основана на центральном явлении квантовой механики — квантовой запутанности, которая позволяет частицам оставаться взаимосвязанными, несмотря на пространственное разделение [4]. В сетчатке глаз птиц содержится криптохром — белок, в котором два электрона могут образовать запутанную пару с нулевым суммарным спином. За захват фотона в криптохроме отвечает молекула ФАД (флавинадениндинуклеотид), за перенос отвечают молекулы триптофана [5]. После того как молекула поглощает квант света, электроны разделяются, но квантовая запутанность сохраняется. Эта конфигурация становится очень чувствительной к внешним факторам, включая магнитные поля. Магнитные поля по-разному воздействуют на электронные пары и могут вызвать дисбаланс, который изменяет химические реакции с участием отмеченных молекул. Химические процессы, происходящие в глазу птицы, известные как механизм радикальных пар, превращают

эти различия в нервные импульсы, формируя в мозгу пернатых квантовый биохимический компас. Природа с помощью квантовых эффектов уже решила проблему создания квантового биологического компаса. Задача исследователей — разобраться в этих алгоритмах для создания природоподобных технологий навигации.

В настоящем исследовании мы развиваем квантовые модели магнитной ориентации, используя собственные ранее разработанные методы [6, 7] с учетом исследования работы [8]. Предложенные модели основаны на анализе эффектов интерференции, когерентности и запутанности в открытых квантовых системах, подверженных действию квантовых шумов, через исследование недиагональных элементов матрицы плотности квантовой системы, отражающих ее декогерентацию.

Заключение

Хорошо известно, что в задачах квантовых вычислений эффекты декогерентизации разрушают когерентность квантовых состояний и, таким образом, играют негативную роль. Однако декогерентизация может играть и конструктивную роль в управлении квантовой динамикой молекулярных систем и усилении квантовых сигналов до макроскопических масштабов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К. А. Валиева РАН по теме № FFNN-2022-0016

Литература

1. Leggett A. J. Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects // *J. Phys. Condens.*, 2002. Matter 14, R415.
2. Vedral V. Quantify ingentanglement in macroscopic systems // *Nature*, 2008. 453, 19.
3. Wiltshcko R., Wiltshcko W. Avian magnetic compass: its functional properties and physical basis // *Curr. Zool.*, 2010. 56, 265–276.
4. Procopio M., Ritz T. The reference-probe model for a robust and optimal radical-pair-based magnetic compass sensor // *J. Chem. Phys.*, 2020. 152, 065104.
5. Wong S. Y., Benjamin P., Hore P. J. Magnetic field effects on radical pair reactions: estimation of $B_1/2$ for flavin-tryptophan radical pairs in cryptochromes // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2023. 25, 975–982.
6. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Fastovets D. V., Lukichev V. F. Solution of the Schrödinger Equation on a Quantum Computer by the Zalka—Wiesner Method Including Quantum Noise // *JETP Letters*, 2021. Vol. 114. № 6. P. 354–361.
7. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Fastovets D. V., Lukichev V. F. Investigation of coherence and entanglement properties of interfering macroscopic quantum alternatives // *JETP Letters*, 2022. Vol. 115. № 8. P. 520–527.
8. Chervyakov A. V., Chernyavsky A. Yu., Sinitsyn D. O., Piradov M. A. Possible mechanism underlying the therapeutic effects of transcranial magnetic stimulations // *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015. Vol. 9. Art. 303.



УДК 538.91

От классической логики к квантовой (опыт разработки онлайн-курса по гранту МИЭТ)

Кузнецов Ю. А.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2}, Колесникова К. А.¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

Разработан онлайн-курс «Дискретная и математика и квантовая информатика» по введению в квантовую парадигму и квантовые вычисления. Главной задачей курса является вовлечение молодого поколения исследователей в квантовую идею, в развитие новых физических принципов.

Ключевые слова: квантовая информатика; онлайн-курс; квантовые вычисления; квантовые алгоритмы; квантовый компьютер; квантовое превосходство.

Введение

Квантовая информатика — это быстро развивающаяся область науки, которая охватывает множество дисциплин, таких как информатика, дискретная математика, квантовая механика, статистика и множество других.

Целью онлайн-курса является стремление показать, что минимальный порог вхождения в эту область не требует экспертных знаний высшей математики, физики и информатики. Достаточно овладеть основами и базовыми принципами в рамках специализированной школьной программы или базового уровня технических университетов, чтобы начать понимать арифметику квантовых вычислений: что такое квантовые состояния, какие преимущества они могут дать по сравнению с классическими, почему важно создание квантовых алгоритмов и квантового компьютера, что обеспечивает квантовое превосходство.

В целях привлечения новых будущих ученых и исследователей мы разработали онлайн-курс для введения в область квантовой информатики как сферу квантовых информационных технологий.

Строение курса

Видеокурс начинается с введения в основы высшей алгебры, классической булевой алгебры логики. Как математическая основа эффективных быстрых классических и квантовых алгоритмов в онлайн-курс включен раздел «Теория групп». Далее дается историческая канва появления и развития квантовой теории. Раскрываются основы квантовых вычислений, объясняются самые востребованные квантовые алгоритмы и практика работы в облачном сверхпроводниковом компьютере IBM. Курс сопровождается интерактивными текущими вопросами, обучающими электронными тестами для закрепления полученных знаний и небольшими практическими заданиями с электронной оценкой результата. В нем содержится информация о квантовых играх, о кубите, о том, как проводятся квантовые измерения и многие другие прикладные и теоретические вопросы, а также перспективы развития этой чрезвычайно актуальной сферы, способной вывести человечество на новый технологический и социальный уровень развития [1, 2]. Видеолекции выстроены в максимально популярном формате с использованием большого количества

инфографики. Предполагается, что такой формат будет мотивировать студентов и вовлекать настоящих и будущих исследователей в мир квантовых информационных технологий.

Заключение

Онлайн-курс разработан на базе НИУ МИЭТ по целевому конкурсному гранту университета и нацелен на студентов, инженеров и исследователей, желающих ознакомиться с новой областью квантовой информатики и квантовых вычислений. Построен на базе очного семестрового курса Института физики и прикладной математики (ИФПМ НИУ МИЭТ) при технической поддержке студии создания видеоконтента университета.

Литература

1. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежда и реальность. — Ижевск: РХД, 2001. — 352 с.
2. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. — Мир, 2006. — 824 с.

УДК 519.2

Корректировка статистики считывания квантовых состояний с помощью модели нечетких измерений

Дмитриев И. А.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Бантыш Б. И.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2},
Лукичев В. Ф.²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

² Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

В работе проведено исследование влияния корректировки квантовой статистики на точность квантовых измерений. Рассмотрено применение математической модели нечетких измерений к статистике, получаемой посредством квантовых измерений вне зависимости от физической платформы квантовых вычислений.

Ключевые слова: кубиты; квантовые измерения; нечеткие измерения; анализ квантовых данных.

Квантовые измерения играют решающую роль в области квантовых вычислений и квантовой обработки информации. Однако эти измерения подвержены ошибкам, которые могут поставить под угрозу точность и надежность собранных статистических данных. В работе мы решаем эту проблему, используя математическую модель нечетких измерений [1] для коррекции ошибок квантовых измерений.

Основываясь на предыдущей работе, посвященной разработке математической модели нечетких измерений, которая в первую очередь была сосредоточена на квантовой томографии состояний ионных кубитов [2], мы расширяем ее применимость для корректировки статистики, полученной в результате квантовых измерений. Вместо того чтобы анализировать источники и характеристики ошибок считывания, мы вычисляем ошибки считывания, используя предварительные измерения. Используя эти рассчитанные ошибки, мы получаем набор корректировок, которые эффективно исправляют статистику, полученную посредством квантовых измерений. Мы демонстрируем эффективность нашего подхода с помощью обширного численного моделирования. Данный подход к коррекции применим к любой платформе квантовых вычислений, которая опирается на статистические квантовые измерения, тем самым обеспечивая повышение точности квантового анализа данных. Авторы надеются, что данная работа внесет значимый вклад в разработку надежных методов для точного статистического анализа в квантовых системах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №22-12-00263

Литература

1. Bogdanov Yu. I. et al. High-fidelity tomography of fluorescent ion qubits under conditions of limited discrimination between bright and dark levels // Proc. of SPIE, 2022. № 12157. P. 650–657.
2. Bogdanov Yu. I. et al. High-precision tomography of ion qubits based on registration of fluorescent photons // Laser Physics Letters, 2023. № 20. P. 065202.

УДК 004.738.2, 530.16

Влияние квантовых шумов на качество реализации алгоритма квантовой телепортацииГолышев И. К.¹, Богданов Ю. И.^{1,2}¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН**117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1**vanchillago@gmail.com*

Ключевые слова: квантовая телепортация; квантовые шумы; метод Монте-Карло; операторное разложение Крауса.

Исследование влияния квантовых шумов и процессов декогерентизации на квантовые информационные алгоритмы является актуальной задачей и в наши дни вызывает большой интерес специалистов в области квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

В настоящей работе с помощью методов, развитых в нашем исследовании [1], показано, что рассмотрение зашумленного алгоритма телепортации, а также использование зашумленной запутанной пары способны привести к существенным ошибкам при передаче квантовой информации. В рамках разработанных нами компьютерных моделей на языке программирования MatLab выполнено численное моделирование зашумленной схемы квантовой телепортации. Исследование проведено с помощью двух различных методов, включая метод Монте-Карло и метод операторной суммы. Моделирование выполнено для разных значений уровня ошибки и различных типов распределений случайных величин, характеризующих влияние шума. Получены зависимости средних потерь точности квантового телепорта от уровня шумов. Показана статистическая эквивалентность метода Монте-Карло и подхода с применением операторного разложения Крауса при моделировании телепортации с учетом квантовых шумов. В работе также исследовано влияние деполаризующего шума и амплитудно-фазовой релаксации на точность реализации алгоритма квантовой телепортации.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда,
проект № 22-12-00263*

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Фастовец Д. В., Лукичев В. Ф. Решение уравнения Шредингера на квантовом компьютере методом Залки — Визнера с учетом квантовых шумов // Письма в ЖЭТФ, 2021. — Т. 114. — № 6. — С. 391–399.



УДК 530.145

Влияние амплитудной и фазовой релаксации на точность томографии многоуровневых квантовых состояний

Кокшаров К. Б.^{1,2}, Богданов Ю. И.^{1,2}, Богданова Н. А.^{1,2}, Кузнецов Ю. А.^{1,2}, Лукичѳ В. Ф.²

¹ *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

² *Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1*

В настоящем исследовании представлен метод высокоточных квантовых измерений многоуровневых квантовых систем (кудитов) с помощью нечетких квантовых измерений. Разработанный метод применяется для прецизионной реконструкции квантовых состояний в условиях существенного влияния амплитудной и фазовой релаксации.

Ключевые слова: кубиты; кудиты; нечеткие квантовые измерения; квантовая томография; декогеренция.

Основным инструментом для контроля квантовых операций и алгоритмов в условиях реального эксперимента является томография квантовых состояний и процессов. Используя известные математические модели шумов, а также методы численного анализа и статистического моделирования, можно получить исчерпывающую оценку качества и эффективности проектируемых квантовых регистров. Настоящая работа является продолжением нашего исследования [1], направленного на разработку методов высокоточного контроля многоуровневых квантовых систем (кудитов).

Рассмотрены протоколы квантовых измерений на основе взаимнонесмещенных базисов различных размерностей. Исследованы характеристики точности наборов случайных состояний, равномерно распределенных по мере Хаара. Проведено исследование зависимости функции потерь точности от параметров фазовой и амплитудной релаксации. Показано, что результаты выполненных численных экспериментов хорошо согласуются с аналитическими результатами, полученными на основе универсального распределения потерь точности с использованием протоколов нечетких измерений.

Работа выполнена в рамках проекта №22-12-00263 Российского научного фонда

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Кузнецов Ю. А., Кокшаров К. Б., Лукичѳ В. Ф. Прецизионная томография кудитов // Микроэлектроника, 2023. — Т. 52. — № 3. — С. 174–182.

УДК 530.145

Подавление декогеренции при передаче квантового состояния с помощью унитарных операций

Мастюкова А. С.^{1,2,3}, Гавреев М. А.^{1,2,3}, Киктенко Е. О.^{1,2}, Федоров А. К.^{1,2}¹ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрена схема защиты входного многокубитного квантового состояния, основанная на применении зависящих от квантового состояния унитарных операций предварительной и постобработки. С использованием предложенной схемы было получено увеличение точности воспроизведения выходного квантового состояния в случаях индивидуальных и коллективных схем, то есть когда унитарные операции действуют на один кубит или на все кубиты входного квантового состояния. Результаты были получены как в эксперименте с использованием квантового симулятора, так и в реальном эксперименте с помощью облачного доступа к квантовому процессору. Также была рассмотрена практическая задача распределения двухкубитного состояния по удаленным физическим кубитам квантового процессора.

Ключевые слова: декогеренция; запутанное квантовое состояние; подавление ошибок.

Декогеренция является фундаментальным препятствием, ограничивающим производительность устройств квантовой обработки информации. Важность этой проблемы, особенно в случае известных квантовых состояний, лежит в области фундаментальной квантовой информатики [1, 2].

В настоящей работе, следуя недавнему теоретическому предложению, мы изучаем применение зависящих от квантового состояния унитарных операций предварительной и постобработки для защиты заданного (многокубитного) квантового состояния от эффекта декогеренции, действующего на все кубиты. Мы наблюдаем увеличение точности воспроизведения выходного квантового состояния как в эксперименте с использованием квантового симулятора, где все унитарные операторы идеальны, так и в реальном эксперименте с помощью облачного доступа к квантовому процессору, где шум уже влияет и на сами защитные унитарные операторы [3].

Общая идея такой схемы подавления эффекта декогеренции состоит в том, чтобы окружить канал декогеренции двумя унитарными операторами, которые мы называем операторами пред- и постобработки соответственно, точная форма которых определяется как самим каналом декогеренции, так и квантовым состоянием, которое мы защищаем от декогеренции.

Мы демонстрируем возможность подавления эффектов декогеренции в эксперименте с использованием квантового симулятора, где на все кубиты воздействуют одни и те же каналы деполаризации, дефазировки и демпфирования амплитуды, а реализация всех унитарных вентилей считается идеальной. Мы обнаруживаем,



что схема защиты начинает давать преимущество, и наблюдаем увеличение точности воспроизведения начиная с определенного значения степени декогеренции. Также было продемонстрировано, как наша схема может быть использована для защиты двухкубитных состояний при их распределении по удаленным физическим кубитам квантового процессора, т. е. кубитам, которые не могут быть связаны напрямую нативными двухкубитными вентилями.

В работе была также рассмотрена практическая задача распределения двухкубитного состояния по удаленным физическим кубитам квантового процессора. В частности, было проанализировано распределение запутанного квантового состояния в 7-кубитном квантовом процессоре IBM. Это можно рассматривать как прототип эксперимента по реализации передачи квантового состояния между отдельными устройствами обработки квантовой информации, подключенными через квантовый интерфейс.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты по развитию квантовых вычислений» (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021) и программы «Приоритет-2030» НИТУ «МИСИС» по проекту К1-2022-027. Работа Мاستюковой А. С. также поддержана стипендией Президента РФ (№ СП-1351.2022.5)

Литература

1. Bose S. Quantum communication through spin chain dynamics: an introductory overview // Contemporary Physics, 2007. Vol. 48. P. 13–30.
2. Wehner S., Elkouss D., Hanson R. Quantum internet: A vision for the road ahead // Science, 2018. Vol. 362.
3. Gavreev M. A., Kiktenko E. O., Mastiukova A. S. and Fedorov A. K. Suppressing Decoherence in Quantum State Transfer with Unitary Operations // Entropy, 2023. Vol. 25 (1). P. 67.

УДК 530.145

Использование обобщенных переполненных квазивероятностных представлений для минимизации негативности квантовых цепочек

Куликов Д. А.,^{1,4} Яшин В. И.,^{1,3,4} Федоров А. К.,^{1,2} Киктенко Е. О.^{1,2,3}¹ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Математический институт им. В. А. Стеклова РАН

119991, г. Москва, ул. Губкина, 8

⁴ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассматривается описание динамики квантовых систем как стохастической динамики, основанной на переполненных квазивероятностных представлениях. Рассматривается вопрос о минимизации негативности квантовых цепочек в данных представлениях. Исследуется роль переполненности в минимизации негативности.

Ключевые слова: квазивероятностное представление; квантовые вычисления; квантовые цепочки.

Введение

Квантовые компьютеры показывают превосходство над классическими в ряде вычислительных задач [1–2], однако их природа остается неизвестной. На сегодняшний день не существует единого количественного ресурса для оценки этого превосходства. Негативность квантовых цепочек в квазивероятностных представлениях является одним из кандидатов на эту роль [3], а также является мерой сложности классической симуляции квантовых алгоритмов [4–5].

В данной работе был предложен наиболее общий подход к заданию квазивероятностных представлений и разработан алгоритм поиска представления, в котором заданная квантовая цепочка имеет минимальную негативность.

Квазивероятностные представления и минимизация негативности

Квазивероятностное представление e задается набором из M Эрмитовых операторов $\{e_1, \dots, e_M\}$, имеющих единичный след и используемых для представления состояний ρ в виде квазивероятностных распределений p согласно выражению

$$\rho = e[p] = \sum_i p_i e_i.$$

Этот набор может быть использован для представления квантовых состояний ρ в виде квазивероятностных распределений p , а квантовых каналов Φ и измерений F — в виде квазистохастических матриц S и V . Краткий обзор данного подхода представлен на рис. 1.

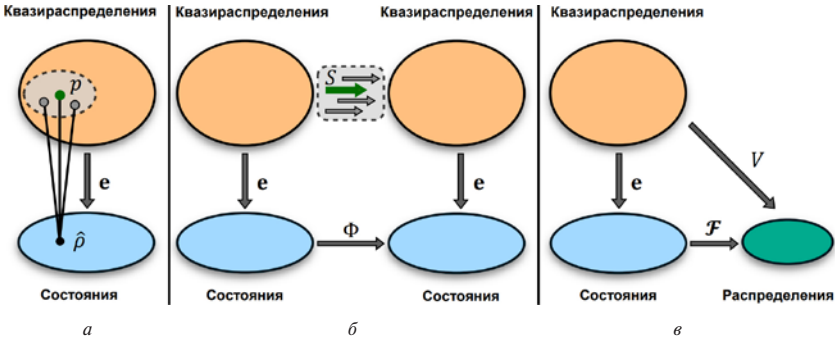


Рис. 1. Элементы квазивероятностного представления квантовой динамики: а) состояние, б) эволюция, в) измерение

Негативности состояний, каналов и измерений в квазивероятностном представлении e определяются следующим образом:

$$\text{Neg}(e, \rho) = \log \left(\min_{\rho \in \mathcal{P}} \|\rho\| \right),$$

$$\text{Neg}(e, \Phi) = \log \left(\min_{S: e \circ S = \Phi \circ e} \|S\| \right) = \max_{m=1..M} \text{Neg}(e, \Phi|e_m),$$

$$\text{Neg}(e, \mathcal{F}) = \log \|\mathcal{F} \circ e\| = \log \|V_1\|.$$

Задачу минимизации негативности можно записать в виде

$$\text{минимизировать } \mathcal{N} = \sum_i \text{Neg}(\rho_i, e) + \sum_j \text{Neg}(\Phi_j, e) + \sum_k \text{Neg}(E_k, e),$$

по параметрам e

при условиях $e_j = e_j, \text{Tr}(e_j) = 1$.

Результаты

Разработанный подход был применен к двум важным классам квантовых цепочек (клиффордовы и вариационные). Основным результатом работы является демонстрация снижения негативности с ростом размерности представления и с ростом уровня шума в системе.

Заключение

В рамках данной работы представлена наиболее общая математическая модель квазивероятностных представлений, разработан алгоритм поиска представления, в котором негативность заданной квантовой цепочки минимальна. Показано снижение негативности с ростом размерности представления и с ростом уровня шума в системе.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-71-10091

Литература

1. Martinis John et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature, 2019. Vol. 574. P. 505.

2. Pan Jian-Wei et al. Quantum computational advantage using photons // *Science*, 2020. Vol. 370. P. 1460.
3. Spekkens R. Negativity and Contextuality are Equivalent Notions of Nonclassicality // *Phys. Rev. Lett.*, 2008. Vol. 101. P. 020401.
4. Pashayan H., Wallman J.J., Bartlett S.D. Estimating outcome probabilities of quantum circuits using quasiprobabilities // *Physical review letters*, 2015. Vol. 115. №7. P. 070501.
5. Koukoulekidis N. et al. Faster Born probability estimation via gate merging and frame optimisation // *Quantum*, 2022. Vol. 6. P. 838.
6. Kulikov D.A. et al. Minimizing the negativity of quantum circuits in overcomplete quasiprobability representations // *arXiv:2306.10758*.



УДК 530.145

Сублинейная факторизация на основе квантового алгоритма приближенной оптимизации: препятствия

Гребнев С. В.¹, Гавреев М. А.^{1,3}, Киктенко Е. О.^{1,3}, Гугля А. П.¹, Ефимов А. Р.^{2,3}, Федоров А. К.^{1,3}

¹ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

² Сбербанк России, Сбер Инновации и Исследования

121357, г. Москва

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Квантовые вычислительные устройства считаются мощным средством решения задачи факторизации, которая лежит в основе широко используемых криптографических инструментов с открытым ключом. Однако реализация алгоритма Шора квантовой факторизации требует значительных ресурсов. В недавней работе [1] заявляется о возможности решения проблемы факторизации с помощью сублинейных квантовых ресурсов. Подход основан на объединении классического алгоритма Шнорра и квантового алгоритма приближенной оптимизации. В нашей работе мы тестируем работоспособность предложенного метода, показываем отсутствие в этом предложении систематического анализа вычислительной сложности классической части алгоритма, в котором используется подход Шнорра, приводим несколько примеров, иллюстрирующих необходимость дополнительного анализа ресурсов для предлагаемого алгоритма квантовой факторизации.

Ключевые слова: целочисленная факторизация; теория решеток; квантовое ускорение; QAOA; RSA.

Алгоритм Шора [2, 3] позволяет решить задачу целочисленной факторизации за полиномиальное время, тем самым открывая перспективы для эффективного криптоанализа существующих протоколов с открытым ключом. Однако ресурсы, необходимые для реализации алгоритма Шора при реальных размерах ключей, весьма значительны, поскольку количество кубитов масштабируется линейно с размерами ключей. С учетом коррекции ошибок реалистичная оценка на сегодняшний день состоит в том, что для восстановления 2048-битного ключа RSA за 8 часов требуется 20 миллионов физических кубитов. В недавней работе [1] заявляется о возможности решения проблемы факторизации с сублинейными ресурсами: в частности, количество кубитов, необходимое для факторизации составного целого числа N , масштабируется как $O(\log(N)/\log(\log(N)))$. Согласно оценке квантовая схема только с 372 физическими кубитами и глубиной $\sim 10^3$ квантовых гейтов необходима, чтобы бросить вызов RSA-2048. Идея предлагаемого метода состоит в том, чтобы выполнить несколько шагов алгоритма факторизации Шнорра [4], основанного на редукции решетки, на квантовом компьютере. Квантовая часть алгоритма основана на алгоритме квантовой приближенной оптимизации (QAOA) [5], который может быть эффективно запущен на современных устройствах. Принимая во внимание недавние демонстрации сверхпроводящего квантового процессора на 433 кубита [6] и квантового симулятора на 256 атомов [7], квантовый

криптоанализ существующих схем криптографии с открытым ключом можно рассматривать как вопрос ближайшего будущего.

Мы заключаем, что результаты, полученные в работах [1, 4], в нынешней форме недостаточно надежны, чтобы оправдать заявления авторов обеих работ, рассматривающих ресурсы, необходимые для практического взлома криптосистемы RSA. Мы заявляем об отсутствии глубокого анализа сложности как классических, так и «квантово-ускоренных» алгоритмов. При параметрах алгоритма, аналогичных рассмотренным в [1], метод Шнорра не может, даже перебрав все возможные перестановки, собрать достаточно полезных соотношений для того, чтобы обеспечить нетривиальную линейную комбинацию показателей при числах из факторной базы, дающую итоговую факторизацию. Сомнения в работоспособности «квантово-ускоренного» метода факторизации вызывает также сама постановка задачи для QAOA, а именно поиск оптимального вектора среди ближайших соседей квазиоптимального решения, а также неоднозначная сходимости алгоритма QAOA при увеличении размерности задачи. Заметим также, что, в отличие от общего алгоритма Шора, метод Шнорра неприменим к дискретному логарифмированию в простой группе, оставляя только случай эллиптической кривой, что также не влияет на постквантовую криптографию на основе решеток.

Литература

1. Bao Yan, Ziqi Tan, Shijie Wei, Haocong Jiang, Weilong Wang, Hong Wang, Lan Luo, Qianheng Duan, Yiting Liu, Wenhao Shi, Yangyang Fei, Xiangdong Meng, Yu Han, Zheng Shan, Jiachen Chen, Xuhaoh Zhu, Chuanyu Zhang, Feitong Jin, Hekang Li, Chao Song, Zhen Wang, Zhi Ma, Wang H. and Gui-Lu Long. Factoring integers with sublinear resources on a superconducting quantum processor // arXiv:2212.12372, 2022.
2. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // SIAM Review, 1999. 41 (2): 303–332.
3. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1994. P. 124–134.
4. Schnorr C. P. Fast factoring integers by svp algorithms, corrected // Cryptology ePrint Archive, 2021. Paper 2021/933.
5. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. A Quantum Approximate Optimization Algorithm // arXiv:1411.4028, 2014.
6. Our quantum roadmap is leading to increasingly larger and better chips, with a 1,000-qubit chip, ibm quantum condor, targeted for the end of 2023. <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>.
7. Ebadi S., Keesling A., Cain M., Wang T.T., Levine H., Bluvstein D., Semeghini G., Omran A., Liu J.-G., Samajdar R., Luo X.-Z., Nash B., Gao X., Barak B., Farhi E., Sachdev S., Gemelke N., Zhou L., Choi S., Pichler H., Wang S.-T., Greiner M., Vuletić V. and Lukin M. D. Quantum optimization of maximum independent set using rydberg atom arrays // Science, 2022. 376 (6598). P. 1209–1215.



УДК 538.945

Формирование и исследование пленок Nb_xGe_{1-x} для сверхпроводниковых однофотонных детекторов

Хыдырова С. Ю.^{1,2}, Ломакин А. И.^{3,4}, к. ф.-м. н. Ковалюк В. В.^{2,3},
д. ф.-м. н. Гольцман Г. Н.^{4,5}, к. т. н. Моисеев К. М.¹

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,

109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

⁴ Московский педагогический государственный университет

119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1

⁵ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
hydyrova.selbi@yandex.ru

Обоснованы перспективы разработки однофотонного детектора на основе сверхпроводящих пленок Nb_xGe_{1-x} . Исследованы сверхпроводящие пленки Nb_xGe_{1-x} толщиной 100 нм, сформированные совместным магнетронным распылением из двух источников. Показана зависимость сверхпроводящих свойств пленок от атомной доли Nb, скорости осаждения пленки и температуры подложки.

Ключевые слова: однофотонный детектор; сверхпроводящая пленка; Nb_xGe_{1-x} ; магнетронное распыление; критическая температура; поверхностное сопотвление.

Одной из наиболее перспективных платформ для квантовых вычислений являются ионы в ловушке. Для регистрации испускаемых ионами фотонов необходимы однофотонные детекторы с низкой скоростью темновых отсчетов, а также высокой эффективностью и критической температурой. Интеграция сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SNSPD) в ионные ловушки обуславливает интерес к альтернативным сверхпроводящим материалам с более высокими критическими температурами по сравнению с наиболее широко используемыми в SNSPD, такими как NbN и $a-W_xSi_{1-x}$, при сохранении высоких характеристик детектора [1–3].

Наиболее высокими критическими температурами T_c среди низкотемпературных сверхпроводников обладают материалы со структурой A15, наибольшая $T_c \sim 23$ К среди которых у Nb_3Ge , не применявшегося ранее для SNSPD [4]. Известно, что сверхпроводящие пленки NbGe с наибольшей $T_c \sim 23$ К получают магнетронным распылением с нагревом подложки и составом, близким к стехиометрическому Nb_3Ge [4, 5]. В связи с этим целью работы является исследование сверхпроводящих свойств пленок Nb_xGe_{1-x} при формировании магнетронным распылением в зависимости от состава, скорости осаждения и температуры подложки.

Пленки Nb_xGe_{1-x} формируются на установке ВУП-11М лаборатории «Вакуумные технологии наноинженерии» кафедры МТ11 МГТУ имени Н. Э. Баумана методом совместного магнетронного распыления из двух источников. Исследуемые пленки толщиной 100 нм осаждаются при различных значениях мощностей

магнетронов: мощность для Ge — от 30 до 50 Вт, мощность для Nb обеспечивает атомную долю Nb в пленке от 65 до 85%, температура подложки варьируется от комнатной до $\sim 400^\circ\text{C}$.

Измерения критической температуры пленок $\text{Nb}_x\text{Ge}_{1-x}$ проводились в лаборатории квантовых детекторов на базе МПГУ в криогенной вставке, погруженной в сосуд Дьюара с жидким гелием ^4He , и выполнялись в широком диапазоне температур от 1,7 до 300 К.

В результате проведенных исследований определены закономерности изменения критической температуры в зависимости от доли Nb, скорости осаждения и температуры подложки; выявлено, что в пределах исследуемого диапазона с увеличением доли Nb в пленке снижается ее поверхностное сопротивление и повышается критическая температура. В дальнейшем планируется исследовать оптические и транспортные характеристики пленок с последующим изготовлением SNSPD для фотонной интегральной схемы.

Литература

1. Shibata H. Review of superconducting nanostrip photon detectors using various superconductors // IEICE Transactions on Electronics. Institute of Electronics Information Communication Engineers, 2021. № 9. P. 429–434.
2. Brown K. R. et al. Materials challenges for trapped-ion quantum computers // Nature Reviews Materials, 2021. 6:10. Nature Publishing Group, 2021. Vol. 6. № 10. P. 892–905.
3. You L. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information // Nanophotonics. De Gruyter Open Ltd, 2020. Vol. 9. № 9. P. 2673–2692.
4. Stewart G. R. Superconductivity in the A15 structure // Physica C: Superconductivity and its Applications. North-Holland, 2015. Vol. 514. P. 28–35.
5. Buitrago R. H., Toth L. E., Goldman A. M. Superconducting Tc's and phase relationships of sputter-deposited Nb_3Ge // J. Appl Phys. American Institute of Physics AIP, 2008. Vol. 50. № 2. P. 990.

УДК 530.145

Векторная магнитометрия с использованием одиночного комплекса NV-¹³C в алмазе

Салказанов А. Т., Васильев А. Н., Гусев А. С., Калосин М. М., Каргин Н. И., Кукин Н. С., Мурадова А. Р., Низовцев А. П., Семенов П. А., Пушкарчук А. Л.
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
 115409, г. Москва, Каширское ш., 31
 alik.salkazanov@inbox.ru

Предложен метод векторной магнитометрии, реализованный с использованием одиночной спиновой системы NV-¹³C в алмазе. Метод основан на априорном знании характеристик сверхтонкого взаимодействия и на наличии экспериментально измеренных положений линий в оптически обнаруживаемом спектре магнитного резонанса такой системы.

Ключевые слова: комплекс NV-¹³C; магнитное поле; ОДМР; сверхтонкое взаимодействие; алмаз.

NV-центры в алмазе (дефекты азот-вакансия) имеют большие перспективы применения в магнитометрии [1]. Однако использование одиночного NV-центра, имеющего симметрию C_{3v} позволяет определить только модуль вектора магнитной индукции B и его полярный угол θ , но для полной реконструкции векторного магнитного поля нужно определять и азимутальный угол φ . В работах [2–3] было показано, что эту проблему можно решить, используя одиночный комплекс NV-¹³C.

В данной работе обсуждается возможность реализации аналогичной векторной магнитометрии с использованием найденного экспериментально одиночного комплекса NV-¹³C, для которого были экспериментально получены спектры оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) при двух различных магнитных полях.

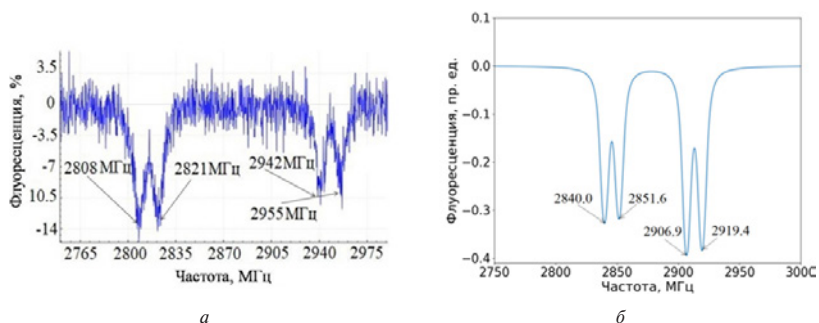


Рис. 1. Спектры ОДМР: а) эксперимент, б) модель

Анализ экспериментальных спектров ОДМР выполнен с использованием базы данных о характеристиках сверхтонкого взаимодействия, полученных в [4]. С помощью этих данных были рассчитаны частоты линий ОДМР при различных значениях параметров: B , θ , φ . Расчеты показали, что частоты переходов слабо зависят

от ϕ и что информация о такой зависимости не может быть получена из имеющихся экспериментальных данных вследствие большой ширины линий ОДМР (~ 5 МГц). Вместе с тем для двух остальных параметров действующего на сенсор NV- ^{13}C магнитного поля — B и θ , описанная методика позволила получить значения, обеспечивающие хорошую аппроксимацию экспериментальных спектров ОДМР. На рис. 1 показан экспериментально измеренный спектр при наличии неизвестного магнитного поля и его аппроксимация.

Таким образом, путем дополнительной обработки данных для двух различных магнитных полей были получены значения B и θ . В долгосрочной перспективе для реализации полноценной векторной магнитометрии с использованием экспериментально исследованного комплекса NV- ^{13}C необходимо улучшить спектральную чувствительность метода ОДМР путем выбора подходящего образца и обеспечения стабильности измерительной аппаратуры.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №21-42-04416)

Литература

1. Rondin L., Tetienne J.-P., Hingant T., Roch J.-F., Maletinsky P., Jacques V. Rondin L., Tetienne J.-P., Hingant T., Roch J.-F., Maletinsky P. Jacques V. Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond // Rep. Prog. Phys., 2014. Vol. 77 (5). 056503.
2. Rao K. R. K., Suter D. Characterization of hyperfine interaction between an NV electron spin and a first-shell ^{13}C nuclear spin in diamond // Physical Review B, 2016. Vol. 94 (6). 060101.
3. Jiang F. J., Ye J. F., Jiao Z., Jiang J., Ma K., Yan X., Lv H. Experimental investigation of vector static magnetic field detection using an NV center with a single first-shell ^{13}C nuclear spin in diamond // Chinese Physics B, 2018. Vol. 27 (5). 057602.
4. Nizovtsev A. P., Kilin S. Ya., Pushkarchuk A. L., Pushkarchuk V. A., Kuten S. A., Zhikol O. A., Schmitt S., Unden T., Jelezko F. Non-flipping ^{13}C spins near an NV center in diamond: hyperfine and spatial characteristics by density functional theory simulation of the C510[NV]H252 cluster // New Journal of Physics, 2018. Vol. 20 (2). 023022.



УДК 621.383.4/5

Состояние работ и перспективы развития матричных ФПУ средневолнового ИК-диапазона спектра

Болтарь К. О.^{1,3}, Бурлаков И. Д.^{1,2}, Власов П. В.¹, Ерошенко В. В.¹,
Лопухин А. А.¹, Яковлева Н. И.¹

¹ Государственный научный центр Российской Федерации

АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

orion@orion-ir.ru

² МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

³ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Представлено состояние работ по разработке матричных фотоприемных устройств средневолнового ИК-диапазона на основе фотодиодов из антимонида индия в АО «НПО «Орион». Исследуется возможность существенного повышения температуры криостатирования МФПУ до 140 К при замене поглощающего материала InSb на более широкозонные структуры типа хВn.

Ключевые слова: ИК-диапазон; МФПУ; InSb; фотодиод; хВn.

Матричные фотоприемные устройства (ФПУ) на основе фотодиодов средневолнового ИК-диапазона наиболее востребованы для различных устройств тепловидения и тепlopеленгации. В АО «НПО «Орион» серийно выпускаются МФПУ на основе объемного антимонида индия форматов 640×512 элементов с шагом 15 мкм с охладителем типа «интегральный Стирлинг» и электронным блоком сопряжения, выпускаются так же МФПУ меньших форматов. Фотоэлектрические характеристики МФПУ ограничиваются только уровнем шума фонового излучения при заданном относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:4.

Продолжаются работы по совершенствованию конструкции и технологии изготовления МФПУ, улучшающие долговременную стабильность ИК-изображения, линейность фотоотклика, однородность спектральных характеристик элементов, качество просветляющих покрытий фоточувствительного элемента, входного окна и оптического фильтра, технологию чернения диафрагмы.

Проработана конструкция МФПУ формата 1280×1024 элементов с шагом 12 мкм. МФПУ с фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального InSb, выращенного методом МЛЭ на высоколегированных подложках InSb, обеспечивают уменьшение взаимосвязи элементов, снижение динамической взаимосвязи, сокращение дефектности.

Исследуется возможность существенного повышения температуры криостатирования МФПУ до 140 К без ухудшения фотоэлектрических характеристик при замене поглощающего материала InSb с граничной длиной волны 5,6 мкм на несколько более широкозонные $Al_{0,02}In_{0,98}Sb$ или InAsSb с граничной длиной волны 4,9 или 4,2 мкм и переходе к структурам типа хВn с блокирующим широкозонным слоем AlInSb.

УДК 621.3.049

Матричные фотоприемники ИК-диапазона на основе нанодисперсных материалов**Попов В. С.^{1,2}, Пономаренко В. П.^{1,2}, Разумов В. Ф.², Иванов В. В.²**¹ *Государственный научный центр Российской Федерации**АО «НПО «Орион»**111538, г. Москва, ул. Косинская, 9**popov.vs@mipt.ru*² *Московский физико-технический институт**(национальный исследовательский университет)**141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Рассмотрены принципы работы перспективных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек. Проанализированы передовые зарубежные и отечественные результаты в области создания фоточувствительных элементов на коллоидных квантовых точках и приборов на их основе.

Ключевые слова: матричные ИК-фотоприемники; коллоидные квантовые точки.

В настоящее время в фотоэлектронике в части перспективных исследований и разработок много внимания уделяется вопросам создания фотосенсоров на основе размерно-квантованных, таких как 0D-, 1D- и 2D, нанодисперсных материалов [1]. В последние три года в области создания матричных ИК-фотоприемных устройств появилось и активно развивается новое направление, связанное с использованием в качестве фоточувствительных материалов нанодисперсных полупроводников, получаемых методами жидкостной химии в виде суспензий — коллоидных квантовых точек. Основной особенностью данного типа матричных фотоприемников является возможность исключения наиболее сложных стадий изготовления, характерных для классической технологии матричных ИК-фотоприемников. Благодаря отсутствию необходимости использования индиевых микроконтактов снимается ограничение, связанное с шагом фоточувствительных элементов матрицы, и предельный шаг начинает определяться топологической нормой СБИС считывания и дифракционным пределом.

За последние несколько лет появились первые промышленные образцы ИК матричных фотоприемников мегапиксельного формата для расширенного спектрального диапазона от видимого диапазона вплоть до 2,0 мкм [2], также были продемонстрированы первые прототипы матричных фотоприемников и камер на их основе, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм [3].

В докладе рассмотрены основные принципы работы перспективных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек и проанализированы описанные в литературе особенности способов их изготовления.

Проанализированы передовые зарубежные и отечественные результаты в данной области, в частности результаты работ, проводимых в АО «НПО «Орион» и МФТИ.

*Литература*

1. Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В. // Успехи прикладной физики, 2021. — Т. 9. — № 1. — С. 25–67.
2. Gregory C., Hilton J. A., Violette K., Shefte S., Procida C., Tessema T., Bond M., Klem E. J. Colloidal quantum dot sensor bandwidth and thermal stability: progress and outlook // *Infrared Technology and Applications XLVIII*, 2022. Vol. 12107. P. 13–20.
3. Yuning Luo, Tan Yimei, Bi Cheng, Zhang Shuo, Xue Xiaomeng, Chen Menglu, Hao Qun, Liu Yanfei and Tang Xin. Megapixel large-format colloidal quantum-dot infrared imagers with resonant-cavity enhanced photoresponse // *APL Photonics*, 2023. Vol. 8. № 5. P. 056109.

УДК 535.643.8

Тонкая настройка качества изображения для вывода на экране OLED-микродисплеев с кремниевой СБИС управленияЗабабурин А. Ю.², Нуриев А. В.¹, к. т. н., Стахарный С. А.¹, Шипицин Д. С.², к. ф.-м. н.¹ АО «ЦНИИ «Циклон»

107076, г. Москва, Шелковское ш., 77

s.staharnyj@cyclone-jsc.ru

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Проведены исследования особенностей настройки качества изображения для вывода на экране OLED-микродисплеев с кремниевой СБИС управления. Исследования проведены с учетом физических свойств электролюминесцентных OLED-структур и управляющих пиксельных ячеек кремниевой СБИС управления. Приведены закономерности и алгоритмы преобразования входного цифрового видеосигнала для получения наиболее информативного визуального отображения на экране OLED-микродисплеев без потери качества исходного изображения.

Ключевые слова: OLED; Si-OLED; microdisplay; VLSI; image display; органические светодиоды; ОСИД; микродисплеи; кремниевые СБИС; средства отображения информации.

На сегодняшний день активно развиваются индивидуальные средства отображения информации, построенные на миниатюрных дисплеях — микродисплеях. Одним из самых перспективных направлений в изготовлении данных устройств являются микродисплеи на основе органических светодиодов (OLED) с кремниевой СБИС управления, которые обладают рядом преимуществ:

- эффективный самосветящийся экран, не требующий системы коллимации внешней подсветки;
- высокое быстродействие в широком диапазоне температур, не требующее системы подогрева при отрицательных температурах;
- возможность формирования матричных экранов с высокой плотностью пикселей для изображений высокого разрешения;
- широкий цветовой охват и качество изображения в широком угле обзора;
- хорошая изученность и высокая технологичность производства СБИС управления на основе традиционных кремниевых технологий.

Данные свойства прежде всего определяют компактные габариты и низкое энергопотребление OLED-микродисплеев, что крайне важно при создании портативных эргономичных средств отображения информации (наголовных видеомодулей, очков и шлемов виртуальной, дополненной и смешанной реальности — VR/AR/MR). Вместе с тем OLED-микродисплеи имеют особенности, связанные с фундаментально физическими свойствами электролюминесцентных OLED-структур и особенностями кремниевой технологии при создании СБИС управления. Основной проблемой является наличие существенной нелинейности вольт-яркостной характеристики OLED-структур и порогового напряжения, до достижения которого электролюминесценция отсутствует. Вывод изображения без коррекции



входящего видеосигнала может привести к потере информативности в виде отсутствия изображения в низких тонах градации яркости и существенному искажению зависимости яркости от уровня кодирования исходного видеосигнала.

Были проведены исследования и разработаны алгоритмы преобразования входного цифрового видеосигнала для получения наиболее информативного визуального отображения на экране OLED-микродисплеев без потери качества исходного изображения. Исследования проведены с учетом физических свойств электролюминесцентных OLED-структур, изготовленных в АО «ЦНИИ «Циклон», а также пиксельных ячеек в привязке к отечественной кремниевой технологии с проектными нормами 180 нм АО «Микрон». Результаты работы можно использовать для повышения качества аппаратуры с применением уже разработанных OLED-микродисплеев и для проектирования кремниевых СБИС управления разрабатываемых OLED-микродисплеев с расширенными функциональными возможностями.

Литература

1. Усов Н. Н., Стахарный С. А. Органические светодиоды // Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: «Светотехника», 2019. — С. 47–60.
2. Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н. Гамма-коррекция полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Вестник МГОУ. DOI: 10.18384-2310-7251-2020-3-00-00.
3. Дарвин Д. О., Забаурин А. Ю., Ильин С. А., Илюшкин Т. Ю., Ласточкин О. В., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Титов А. И., Шипицин Д. С. Семейство полноцветных и монохромных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // НАНОИНДУСТРИЯ, октябрь 2021. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.314.316.

УДК 621.383.4/5

Обработка изображений в ОЭС на основе современных отечественных матричных охлаждаемых ИК ФПУ

Полесский А. В.^{1,3}, Бурлаков И. Д.^{1,3}, Драгунов Д. Э.¹, Лазарев П. С.^{1,2},
Ляпустин М. Ю.¹, Старцев В. В.¹

¹АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Представлены достижения в области обработки изображений в ОЭС средне-волнового ИК-диапазона, использующих отечественные матричные ФПУ на основе антимолибдита индия и КРТ.

Ключевые слова: обработка изображений; средневолновый ИК-диапазон; MWIR; матрицы; фотоприемные устройства; ОЭС (оптико-электронные системы).

Основной задачей любой тепловизионной оптико-электронной системы является формирование изображений в видимом диапазоне на основе теплового распределения наблюдаемой сцены. Изображения, полученные таким образом, должны отвечать ряду требований, одним из которых является минимальное время обнаружения и распознавания объектов. Современные образцы ИК-техники, представленные на рынке, помимо общеизвестных алгоритмов обработки изображений также оснащены более современными алгоритмическими решениями, что позволяет добиться увеличения отношения сигналов объектов к фону и повысить резкость границ объектов.

Классические алгоритмы обработки ИК-изображений (деселекция дефектных элементов, двух- или трехточечная коррекция чувствительности, линейное преобразование контраста и яркости изображения) не способны обеспечить оптимальную трансляцию динамического диапазона исходного кадра (12–14 бит) в динамический диапазон отображающего устройства (8 бит). Для решения этой задачи применяются нелинейные преобразования значений исходного динамического диапазона. Такие преобразования способны обеспечить визуализацию наблюдаемой тепловизионной сцены без потери информации о наблюдаемых объектах.

Приведены алгоритмы нелинейных преобразований динамического диапазона исходного кадра для наиболее информативной визуализации наблюдаемой сцены, а также их программно-аппаратная реализация в структурах, использующих отечественные матричные фотоприемные устройства формата 640×512 на основе антимолибдита индия производства АО «НПО «Орион» и на основе КРТ производства ИФП СО РАН аналогичного формата. Результаты работы приведенных алгоритмов продемонстрированы на рис. 1.

Поскольку нелинейные преобразования пикселей исходного изображения являются чувствительными к качеству фотоприемного устройства, данные



алгоритмы применимы только на ФПУ хорошего качества. Исследования показали, что ФПУ производства АО «НПО «Орион» и ИФП СО РАН имеют высокое качество, что позволяет в полной мере применять подобные алгоритмы.



Рис. 1. Результаты действия разработанных алгоритмов (слева — исходное изображение, справа — изображение после нелинейных преобразований)

Литература

1. Драгунов Д. Э., Курганов И. П., Полесский А. В., Юдовская А. Д., Деомидов А. Д., Соломонова Н. А., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Шарганов К. А. // Успехи прикладной физики, 2021. — Т. 9. — № 5. — С. 410–416.
2. Сорокин Д. В., Драгунов Д. Э., Ляпустин М. Ю., Семенченко Н. А., Шарганов К. А. // Прикладная физика, 2022. — № 1. — С. 34–41.
3. Ляпустин М. Ю., Драгунов Д. Э., Алексеев А. А. // Успехи прикладной физики, 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 139–145.
4. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Власов П. В., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г., Полунеев В. В., Рудневский В. С., Савостин А. В. // Прикладная физика, 2014. — № 2. — С. 41–44.
5. Kreit Eric, Mäthger Lydia M., Hanlon Roger T., Dennis Patrick B., Naik Rajesh R., Forsythe Eric and Heikenfeld Jason // Journal of The Royal Society Interface. Jan. 2013. Vol. 10. Issue 78.

УДК 621.383.4/5

Проблемы и пути создания охлаждаемого устройства мегапиксельного формата на диапазон спектра 3–5 мкм

Мирофяченко А. Е., Мирофяченко Е. В., Якушев Т. Ю.*АО «НПО «Орион».**111538, г. Москва, ул. Косинская, 9**a.mirofyanchenko@yandex.ru*

В докладе освещаются проблемы и пути создания первого отечественного охлаждаемого матричного фотоприемного устройства мегапиксельного формата на средневолновый инфракрасный (3–5 мкм) диапазон спектра на основе антимоноидов.

Ключевые слова: мегапиксель; ФЧЭ; InSb; ИК МФПУ; SWaP; БИС-считывания; средневолновой ИК-диапазон.

Технологии инфракрасной (ИК) фотоэлектроники играют важную роль в развитии тепловидения, техники ночного видения и многих других областей современной техники, физики и оптики. Системы на их основе во всем мире признаны критически важными и определяют уровень научного и технологического прогресса страны.

Производители современных ИК матричных фотоприемных устройств (МФПУ) при разработке руководствуются как стоимостью конечного изделия, так и сложившейся тенденцией SWaP, суть которой состоит в снижении энергопотребления и массогабаритных характеристик, а также улучшением основных параметров фотодетекторов согласно критериям Джонсона.

Идентификация объекта ИК-системой на основе МФПУ — сложная задача, для решения которой требуется увеличение разрешения и чувствительности ИК-системы. Переход на МФПУ с меньшим шагом пикселя и большим форматом позволит увеличить дальность обнаружения, при этом с технологической точки зрения крайне важно преодоление барьера создания мегапиксельной матрицы с шагом 10–12 мкм. Наиболее близкое устройство по рассматриваемой теме — ИК МФПУ на основе InSb формата 640×512 с шагом 15 мкм производства АО «НПО «Орион» [1]. При разработке устройства увеличенного формата необходимо решить ряд проблем:

- снижение фотоэлектрической взаимосвязи между пикселями с помощью глубокого мезатравления с применением плазмохимических процессов травления вместо жидкостных, т.к. использование последнего приводит к уменьшению активной области фоточувствительных элементов (ФЧЭ);
- совершенствование технологии гибридизации с помощью In-микроструктур;
- повышение однородности толщины и свойств функциональных слоев, в т.ч. диэлектрических по площади пластины, т.к. неравномерность откликов пикселей является источником пространственного шума, что отрицательно влияет на уровень эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) и динамический диапазон работы устройства.

Сложная ситуация сложилась и в плане обеспечения материалами. Несмотря на сильную школу проектирования в РФ, производство БИС-считывания



мегапиксельного формата для ИК МФПУ отсутствует. В сфере производства фоточувствительного материала АО «Гиредмет» несколько лет назад продемонстрировал возможность изготовления монокристаллов антимонида индия и галлия диаметром 100 мм, однако серийный выпуск налажен только для диаметра 50 мм, применение которого нерентабельно при изготовлении устройств мегапиксельного формата. Отставание наблюдается в области производства высокочистых материалов (6N–9N), что в совокупности создает угрозы для технологического суверенитета страны на ближайший период.

Недостаточное разрешение современных отечественных фотоприемных устройств на диапазон спектра 3–5 мкм не обеспечивает необходимую дальность обнаружения и распознавания. Поэтому на сегодняшний день требуется повышение пространственного разрешения в тепловизионных каналах путем создания высокочувствительных мегапиксельных матриц с малым шагом элементов, детектирующих излучение в диапазоне спектра 3–5 мкм. Создание мегапиксельного устройства на основе антимонидов в России возможно в ближайшие 1–2 года при комплексном планировании, реализации стратегических программ развития с достаточным уровнем финансирования на государственном уровне.

Литература

1. Борисов: Россия заменила французские тепловизоры для бронетехники отечественными // ТАСС 14.09.2018. — <https://tass.ru/politika/5564274> (дата обращения: 16.08.23).

УДК 621.396

Создание и применение оптических термопластов с заданным ходом дисперсионной кривой

Агринский М. В.¹, Агринский Н. Н.², Откупман Д. Г.², Попов В. К.¹¹ АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1

magr829@yandex.ru

² Московский государственный университет геодезии и картографии

105064, г. Москва, Гороховский пер., 4

nijforok@outlook.com

Созданы оптические материалы — термопласты. Показано применение созданных термопластов в объективах с апохроматической абберационной коррекцией.

Ключевые слова: полимерные оптические материалы; термопласты; ход дисперсионной кривой; апохроматическая абберационная коррекция; объектив.

Для обнаружения и распознавания малоразмерных и значительно удаленных объектов съемки требуются объективы с фокусным расстоянием f' более 100 мм. При использовании неорганического оптического стекла для линз такого объектива вес его, по сравнению с короткофокусными, применяемыми сейчас, возрастет минимум на порядок, что неприемлемо для легких БПЛА. Применением в оптической схеме объектива линз из органического стекла (полимеров) задача по снижению веса объективов с $f' > 100$ мм частично решается. Так, удельный вес поликарбоната (ПК) примерно в 10 раз меньше, чем у силикатного стекла. Ограничением является то, что доступными оптическими полимерами являются только полиметилметакрилат (ПММА) и поликарбонат (ПК) [1], чего явно недостаточно для хроматической абберационной коррекции, особенно длиннофокусных объективов.

Качество изображения линзовых оптических систем высокой светосилы, работающих в широком спектральном диапазоне, в значительной степени обусловлено остаточными хроматическими абберациями. Для построения качественного изображения необходимо исправить в системе не только первичный хроматизм, но и вторичный спектр, наличие которого накладывает ограничение на предельно достижимые технические характеристики системы, в частности на возможность развития относительного отверстия. Для эффективной коррекции вторичного спектра необходимы материалы с заданным ходом дисперсионной кривой, характеризующейся такими параметрами, как относительная частная дисперсия P_{FD} и коэффициент дисперсии ν_d .

Для расширения каталога полимерных оптических материалов в целях проектирования объективов апохроматов были созданы нетрадиционные оптические материалы — термопласты:

1) оптическая среда (термопластичная) с показателями преломления $n_F = 1,6310$, $n_d = 1,6203$, $n_C = 1,6074$; плотностью $1,17$ г/см³; поверхностным натяжением 36 дин/см; областью прозрачности от $0,33$ до $1,8$ мкм;



2) оптическая среда (термопластичная) с показателями преломления $n_f = 1,6501$, $n_d = 1,6385$, $n_c = 1,6236$; плотностью $1,34 \text{ г/см}^3$; поверхностным натяжением 43 дин/см ; областью прозрачности от $0,35$ до $2,0 \text{ мкм}$.

Проведен расчет объектива-апохромата. Параксиальные характеристики следующие: $f' = 100 \text{ мм}$; размер изображения $2y' = 11,2 \text{ мм}$; диафрагменное число $F/\# = 3,3$. На рис. 1 представлено схемное изображение объектива.

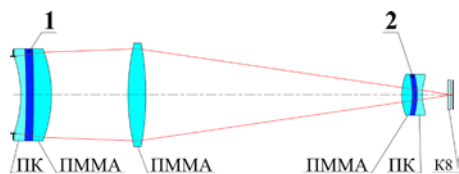


Рис. 1. Схемное изображение объектива, где в голубой цвет окрашены полимеры, а в синий — созданные термопласты

Литература

1. Серова В. Н. Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров: монография // Федер. агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. — Казань: КГТУ, 2010. — 540 с.

УДК 621.383.523

Разработка кремниевого лавинного фотумножителя непланарной конструкции

Виноградов С. Л.^{1,2}, Жуков А. А.³, Ветчинин С. А.³, Дюжев Н. А.⁴,
Чиненков М. Ю.⁴, Филиппов Н. А.⁴, Парамонов В. В.⁴, Денисов В. Е.⁴

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

² ООО «Фотосенсорные технологии»

124482, г. Москва, г. Зеленоград, Савёлкинский проезд, 4, оф. 4с

³ НПК «Технологический центр»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

⁴ ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база»,
НИУ «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Кремниевые фотумножители (SiPM) позволяют детектировать малофотонные импульсы света с разрешением числа фотонов. Разработана новая конструкция SiPM на основе особенностей лавинного пробоя в непланарном p - n -переходе. Представлены первые результаты измерений разработанных чипов и проекта в целом.

Ключевые слова: кремниевый фотумножитель; SiPM; лавинный фотодиод; ЛФД; лавинный пробой; p - n -переход; разрешение числа фотонов.

Кремниевые фотумножители (SiPM, а также КФУ, Si-ФЭУ, MAPD, MPPC) были разработаны в 1990–2000-е годы в России (ИЯИ/МЭЛЗ, ЦПТА, МИФИ/«Пульсар», ОИЯИ) и получили мировое признание как новый тип фотодетекторов с высоким разрешением числа фотонов в малофотонных световых импульсах, начиная с единичных фотонов [1].

С 2010-х годов ведущие мировые производители фотосенсоров выпускают SiPM на основе планарного p - n -перехода. В последние годы параметры планарных SiPM приближаются к физическим пределам по динамическому диапазону и эффективности, что особенно критично при разработке SiPM ИК-диапазона для лазерной дальнометрии [2].

Принципиальное повышение основных фотоприемных параметров SiPM может быть достигнуто в непланарных конструкциях SiPM на основе сферического p - n -перехода за счет усиления электрического поля, уменьшения напряжения лавинного пробоя и емкости лавинной ячейки ЛФД в геометрии электродов с микронным радиусом кривизны [3]. На прототипе такой конструкции — Tip Avalanche Photodiode (TAPD) — были получены рекордные параметры по эффективности детектирования в видимом (73 % на 608 нм) и ИК (22 % на 905 нм) диапазонах спектра, а также по быстродействию (мертвое время ~4 нс) по сравнению с лучшими планарными SiPM от Hamamatsu, Broadcom, On Semiconductor и др. [3–5].

В докладе представлены первые результаты нашего проекта «Разработка SiPM непланарной конструкции» за 2022–2023 гг., включая результаты измерений разработанных чипов SiPM. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (грант № 32ГТСПРЭС14/72448 от 24.12.2021) и проведена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.

*Литература*

1. Sadygov Z., Sadigov A., Khorev S. Silicon Photomultipliers: Status and Prospects // Phys. Part. Nucl. Lett., 2020. 17. 160–176.
2. Vinogradov S., Popova E. Status and perspectives of solid state photon detectors // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect., 2020. A 952. 161752.
3. Vinogradov S. Tip Avalanche Photodiode—A spherical-junction SiPM concept // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A 1045 (2023), 167596.
4. Engelmann E., Schmailzl W., Iskra P., Wiest F., Popova E., Vinogradov S. Tip Avalanche Photodiode—A New Generation Silicon Photomultiplier Based on Non-Planar Technology // IEEE Sensors J. 21 (2020), 6024–6034.
5. Виноградов С.Л. О разработке кремниевого лавинного фотоумножителя с рекордными параметрами // Наноиндустрия, 2023. — 16. — С. 457–462.

УДК 621.383.525

Оптимизация конструкции гетероструктуры биполярного барьерного детектора на основе InGaAs/AlInAs

Савчук А. А.¹, Чельный А. А.¹, Ахмеров Ю. Л.¹, Меженный М. В.¹,
Роговский Е. С.¹, Жаркова А. А.^{1,2}

¹ АО «Оптрон»

105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, корп. 7
savhuk@optron.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
savhuk@optron.ru

Представлена методика моделирования удельной обнаружительной способности (D^*) биполярного барьерного детектора на основе InGaAs/AlInAs (pVn) из статических характеристик. Промоделировано влияние параметров слоев на обнаружительную способность детектора.

Ключевые слова: барьерный детектор; InGaAs; SWIR; шумовой ток.

Введение

В pVn-детекторах разделение фотоиндуцированных носителей заряда происходит за счет диффузии с помощью потенциального барьера для одного типа носителей. Такая конструкция позволяет обеспечить приемлемую чувствительность при отсутствии электрического поля в поглощающем слое [1].

Целью данной работы являются исследование и оптимизация влияния уровня легирования и положения p - n -перехода для повышения D^* pVn-детектора SWIR-диапазона.

Методика, результаты и обсуждение

Для расчета D^* в модели были использованы тепловой и световой шум [2]. С помощью обработки ВАХ экспериментальной структуры pVn-детектора получены значения дифференциального сопротивления, спектральной чувствительности, а также рассчитана D^* . Полученные результаты были сравнены с экспериментальным измерением, рис. 1.

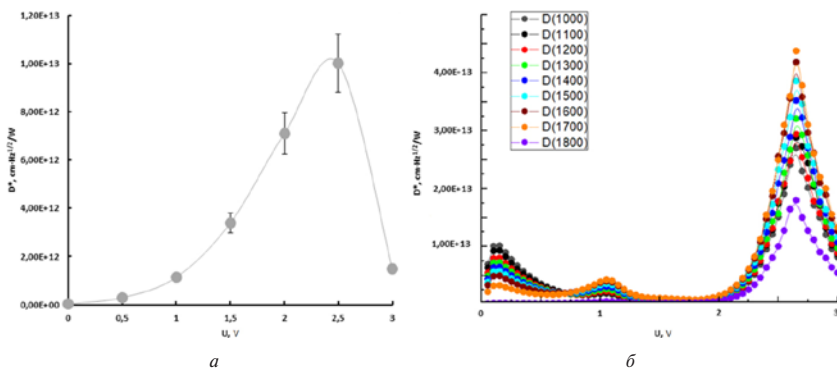


Рис. 1. D^* экспериментальной гетероструктуры: а) измеренная для 1550 нм; б) рассчитанная из ВАХ для различных длин волн



В среде Sentaurus TCAD проведено моделирование рВп-структуры с различными толщинами и легированием слоев. Легирование фоточувствительного слоя и барьера *n*-типа ключевым образом влияет на D^* . Положение *p-n*-перехода определяет напряжение, при котором достигает максимума квантовая эффективность. Наибольшее значение D^* было получено для структуры, представленной в табл. 1, и составило $5,5 \cdot 10^{13}$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$ при 0,8 В.

Таблица 1. Параметры структуры с наибольшей D^*

№	Слой	Материал	Толщина, мкм	Легирование, см $^{-3}$
1	Контактный	InGaAs	0,1	$p-5 \cdot 10^{18}$
2	Барьерный	AlInAs	0,55	$p-5 \cdot 10^{18}$
3	Барьерный	AlInAs	0,05	$n-5 \cdot 10^{17}$
4	Фоточувствительный	InGaAs	1,5	$n-1 \cdot 10^{17}$
5	Подложка	InP	1	$n-2 \cdot 10^{18}$

Заключение

Методика моделирования D^* была верифицирована с помощью сравнения с экспериментальными данными. Моделирование показало, что оптимизация легирования и толщины фоточувствительного слоя позволяет повысить D^* за счет создания гетероструктуры с высоким дифференциальным сопротивлением в диапазоне напряжений, при которых происходит снятие барьера для дырок между фоточувствительным и барьерным слоем.

Литература

1. Болтарь К. О. и др. Фотосенсорика коротковолнового ИК-диапазона спектра // Успехи прикладной физики, 2021. — Т. 9. — № 6. — С. 479.
2. Capper P., Elliott C. T. (ed.). Infrared detectors and emitters: materials and devices. Springer Science & Business Media, 2013. Vol. 8.

УДК 621.383

Применение программных продуктов САПР для моделирования оптико-электронных, электромагнитных и термомеханических свойств перспективных матричных микроболометрических приемников ИК-излучения**Солодков А. А., Москвичев В. Ю., Шилейко Н. А.***АО «ОКБ «Астрон»**140081, г. Лыткарино, а/я 1040**info@astrohn.ru*

Представлены результаты отработки вариантов применения САПР для моделирования оптико-электронных, электромагнитных и термомеханических свойств перспективных матричных микроболометрических приемников ИК-излучения в рамках реализации ряда технологических проектов по созданию перспективных образцов.

Ключевые слова: микроболометрический; матричный приемник; инфракрасное (ИК) излучение; микроэлектромеханические системы (МЭМС).

Программные продукты САПР находят все более широкое применение для моделирования устройств на основе микроэлектромеханических систем (далее — МЭМС) различного назначения, включая неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники (далее — ММБП) ИК-излучения, в которых чувствительные элементы реализуются на базе конструкций мембранного типа в рамках решений в области микромеханики. Это связано с потребностями достижения экстремальных значений параметров за счет различных конструктивно-технологических решений и необходимо проработки методами моделирования множества вариантов таких решений.

Проработка множества возможных вариантов компоновки планируемого к изготовлению перспективного ММБП возможна только при использовании многозадачной САПР (в зарубежной классификации — Multiphysics) или нескольких САПР, для которых обеспечивается взаимная передача результатов. Зарубежными разработчиками САПР предлагается ряд пакетов моделирования МЭМС-устройств, содержащих специализированные модули для моделирования оптико-электронных, электромагнитных и термомеханических свойств ММБП, в частности такие, как COMSOL Multiphysics® Software, ANSYS, CoventorMP [1, 2]. Также следует отметить, что для моделирования электронных матричных коммутаторов — мультиплексоров сигналов (МКМС), обеспечивающих считывание полезных сигналов, формируемых МЭМС-элементами в ММБП, применяется достаточно широкий круг САПР, однако для перспективных проектов требуются такие САПР, которые включают модули проектирования как аналоговых, так и цифровых схем, например Cadence Virtuoso.

Специалистами АО «ОКБ «Астрон» в рамках реализации ряда технологических проектов, направленных на создание перспективных ММБП ИК-излучения для систем формирования тепловизионных изображений, удовлетворяющих современным и перспективным требованиям потребителей, отработан методический подход по применению отдельных программных продуктов САПР для моделирования конструкций и физических свойств таких ММБП.

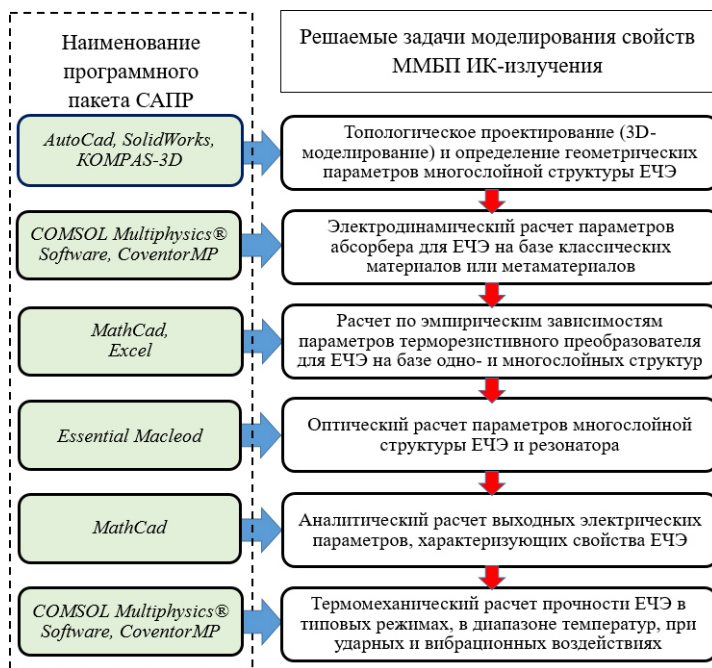


Рис. 1. Последовательность выполнения действий при моделировании и проектировании ММБП при применении САПР

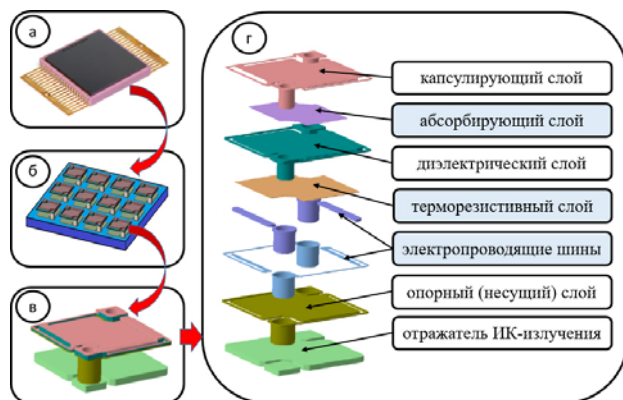


Рис. 2. Графические изображения ММБП в сборе (а), фрагмента кристалла ММБП с чувствительными МЭМС-элементами (б), отдельного чувствительного МЭМС-элемента (в) и послышной конструкции (структуры) отдельного чувствительного МЭМС-элемента (г)

Последовательность выполнения действий по моделированию и проектированию ММБП с использованием САПР отработана применительно к конструкции единичного чувствительного элемента (ЕЧЭ) для ММБП из разряда конструкций «классического типа», представляющей собой микромостиковую конструкцию в виде тонкой мембраны, состоящей из нескольких функциональных слоев. Последовательность выполнения действий представлена на рис. 1. Графические изображения ММБП в сборе и отдельных его составных элементов, а также типовая структура слоев отдельного чувствительного МЭМС-элемента, спроектированная в одном из пакетов топологического проектирования, представлена на рис. 2.

Литература

1. Niranjan A., Gupta P. Modeling and Simulation Software in MEMS Design // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). ISSN: 2249-8958, 2020. №9. P. 2501–2506, DOI: 10.35940/ijeat.C5770.029320.
2. Соловьев А., Курдюков С. Современные решения для моделирования и проектирования МЭМС в среде CoventorMP // Электроника НТБ, 2021. — №3. — С. 66–71.



УДК 621.383

Фотоприемное устройство на основе матричного микроболометрического детектора со спектральным диапазоном чувствительности 2–16 мкм

Хафизов Р. З., Белоконов В. М., Москвичев В. Ю., Серов В. В., Шилейко Н. А., Шатунов Д. Ю., Сильницкая О. А.

АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

Разработано ФПУ на основе матричного микроболометрического детектора с равномерным спектром поглощения на уровне 90% в диапазоне 2–16 мкм. Приведены результаты экспериментальных исследований параметров ФПУ, демонстрирующие возможности расширения характеристик оптико-электронных систем.

Ключевые слова: ИК-излучение; микроболометрические детекторы; ФПУ; оптико-электронные системы (ОЭС).

Матричные микроболометрические детекторы, обеспечивающие широкополосное поглощение теплового излучения, позволяют существенно улучшить характеристики ОЭС по обнаружению, распознаванию и идентификации техногенных объектов, составные части которых в результате функционирования нагреваются в широком (от 30 до 300 °С) диапазоне температур [1].

На рис. 1 представлена спектральная характеристика ФПУ с матричным микроболометрическим детектором (формат 640×480, шаг пикселей 17 мкм), демонстрирующая равномерное поглощение ИК-излучения (на уровне 90%) в диапазоне 2–16 мкм.

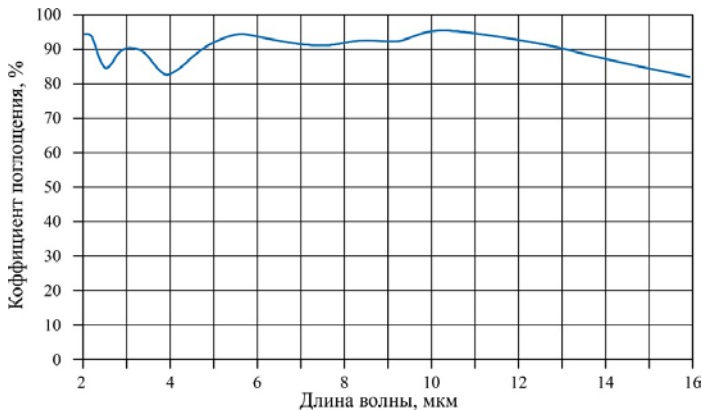


Рис. 1. Спектральная характеристика поглощения ИК-излучения ФПУ с матричным микроболометрическим детектором (формат 640×480, шаг пикселей 17 мкм)

Проведены экспериментальные исследования по сравнению характеристик ФПУ в составе оптико-электронного модуля, разработанного АО «ОКБ «Астрон», при регистрации излучения в различных (3–5, 8–12, 2–16 мкм) ИК-диапазонах. Показано, что реализация широкополосной чувствительности позволяет улучшить тепловизионные и тепlopеленгационные возможности ОЭС.

Литература

1. Хафизов Р. З., Старцев В. В., Москвичев В. Ю. Быстродействующие болометрические матричные детекторы // Фотоника, 2021. — Т. 15. — № 5. — С. 396–409.



УДК 621.383

Регистрация импульсного терагерцевого излучения неохлаждаемыми матричными микроболометрическими приемниками

Демьяненко М. А.¹, Старцев В. В.², Москвичев В. Ю.³¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13² Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
demyanenko@isp.nsc.ru³ АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

Исследован отклик матричных микроболометрических приемников на импульсное терагерцевое излучение в зависимости от величины теплопроводности болометра. Показано, что сигнал микроболометра слабо зависит от теплопроводности, если время тепловой релаксации болометра превышает длительность импульсов излучения. Исследованные приемники на длине волны 100 мкм характеризуются минимальной обнаружимой мощностью $1,4 \cdot 10^{-9}$ Вт/пиксель и минимальной обнаружимой энергией $2 \cdot 10^{-11}$ Дж/пиксель.

Ключевые слова: микроболометр; импульсное терагерцевое излучение.

Введение

Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники (ММБП) традиционно применяются в системах регистрации инфракрасного (ИК) и терагерцевого (ТГц) излучения [1] с постоянной или медленно меняющейся интенсивностью. Однако в ряде задач, например при необходимости регистрации ТГц-излучения, отраженного от удаленных объектов, требуется подсветка импульсным излучением. Кроме того, некоторые источники ТГц-излучения, например основанные на фотопроводящих антеннах и на нелинейных оптических кристаллах, имеют импульсный характер работы или подобно квантовому каскадным лазерам обладают значительно большей мощностью в импульсном режиме работы. Применение неохлаждаемых ММБП для регистрации импульсов ТГц-излучения требует проведения дополнительного исследования особенностей их работы.

Отклик микроболометрических приемников на импульсное терагерцевое излучение

В настоящей работе экспериментально исследуются величины отклика (сигнала) изготовленных в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) ММБП форматом 320×240 (размер пикселя — 51×51 мкм, высота подвески мембраны болометра с поглотителем излучения над подложкой — 2 мкм) на импульсное ТГц-излучение квантово-каскадного лазера, работающего на длине волны 100 мкм, в зависимости от величины теплопроводности болометра G , связанной со временем тепловой релаксации болометра соотношением $\tau = C/G$, где C — теплоемкость болометра. При высоком вакууме теплопроводность болометра составляла $G0 = 10^{-7}$ Вт/К, а время тепловой релаксации болометра составляло $\tau0 = 15$ мс и понижалось при повышении давления газа внутри вакуумного корпуса приемника, приводящем к повышению G .

На мембрану микроболометров первых 180 строк матричного приемника был нанесен тонкий металлический поглотитель излучения со слоевым сопротивлением $\approx 70 \text{ Ом/квadrat}$, у болометров остальных 60 строк металлический поглотитель отсутствовал (рис. 1а). Входное окно ММБП выполнено из непросветленного высокоомного кремния. Мощность излучения лазера $P_{\text{ТГц}}$ составляла 50 мкВт.

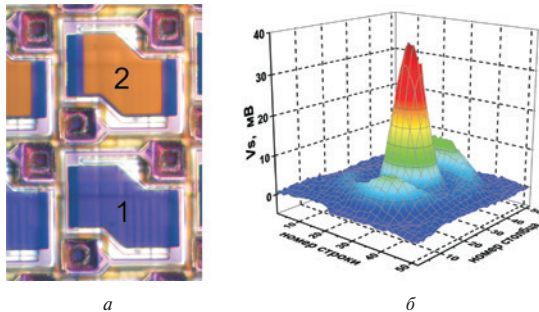


Рис. 1. Фрагмент ММБП: 1 — микроболометр без металлического поглотителя, 2 — с поглотителем (а); топограмма сигнала ММБП при его освещении импульсом ТГц-излучения протяженностью 70 мс (б)

На рис. 1б показана топограмма пикового значения сигнала ММБП при его освещении импульсом ТГц-излучения протяженностью 70 мс (значительно превышающим $\tau_0 = 15 \text{ мс}$), при которой зависимость сигнала от времени выходила на насыщение и, следовательно, сигнал соответствовал режиму постоянного освещения. Интегральная величина сигнала V_S по всем пикселям составила $Int = 8,7 \cdot 10^3 \text{ мВ}$. Чувствительность микроболометров к ТГц-излучению $S = Int/P_{\text{ТГц}} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ В/Вт}$, что при учете величины шума приемника $Noise = 0,25 \text{ мВ}$ дает пороговую мощность $P_{th} = Noise/S = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/пиксель}$.

В целях исследования отклика матричного микроболометрического приемника на импульсное терагерцевое излучение в зависимости от величины теплопроводности болометра или времени тепловой релаксации болометра с помощью линз на поверхности ММБП одновременно создавалось как изображение модели абсолютно черного тела (АЧТ), нагретого до 400°C , так и изображение сфокусированного импульсного ТГц-излучения (см. вставку на рис. 2). Из рис. 2 следует, что наличие металлического поглотителя повышает чувствительность болометра не только к ТГц-излучению, но и к ИК излучению АЧТ. Постоянное ИК-излучение от АЧТ использовалось для определения времени тепловой релаксации болометра τ (и, соответственно, теплопроводности болометра $G = G_0 \tau_0/\tau$). Указанное на рис. 2 значение времени тепловой релаксации τ при повышении давления газа в корпусе приемника определялось по соотношению $\tau = \tau_0(V_{S_IR_cont}/V_{S_IR_cont_0})$, где $V_{S_IR_cont_0}$ и $V_{S_IR_cont}$ — значения сигнала в области постоянной ИК-засветки при высоком и пониженном вакууме соответственно.

На рис. 2 показаны зависимости пикового значения сигнала ММБП $V_{S_ТГц_imp}$ от времени тепловой релаксации τ при его облучении импульсами ТГц-излучения (длительность 2 и 3 мс, период $T = 40 \text{ мс}$). Теоретические зависимости



рассчитывались по соотношениям, приведенным в [2]. Видно, что в соответствии с изложенным в [2] при значениях τ , много больших длительности импульса излучения t_{opt} , величина сигнала $V_{S_THz_imp}$ при воздействии на приемник импульсного излучения слабо зависит от τ . Минимальная обнаружимая энергия импульса ТГц-излучения может быть определена как $Q_{th} = \tau P_{th} = 2 \cdot 10^{-11}$ Дж/пиксель.

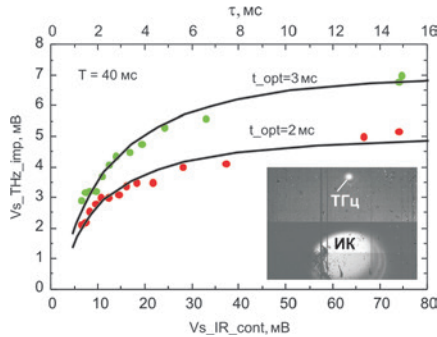


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и теоретические (линии) зависимости пикового значения сигнала ММБП $V_{S_THz_imp}$ от времени тепловой релаксации τ и величины сигнала $V_{S_IR_cont}$ в области постоянной ИК-засветки при его облучении импульсами ТГц-излучения длительностью 2 и 3 мс

Заключение

Показано, что сигнал микроболометра при воздействии на него импульсного терагерцевого излучения слабо зависит от теплопроводности болометра, если время тепловой релаксации болометра превышает длительность импульсов излучения. Исследованные приемники на длине волны 100 мкм обладают минимальной обнаружимой мощностью $1,4 \cdot 10^{-9}$ Вт/пиксель и минимальной обнаружимой энергией $2 \cdot 10^{-11}$ Дж/пиксель. Простейшим способом дальнейшего повышения чувствительности микроболометров является просветление входного окна и увеличение высоты подвески тонкого металлического поглотителя от 2 до 4–5 мкм и более.

Литература

1. Nemoto N., Kanda N., Imai R., Konishi K., Miyoshi M., Kurashina S., Sasaki T., Oda N., Kuwata-Gonokami M. High-Sensitivity and Broadband, Real-Time Terahertz Camera Incorporating a Micro-Bolometer Array With Resonant Cavity Structure // IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol., 2016. Vol. 6. № 2. P. 175–182.
2. Демьяненко М.А., Старцев В.В. Применение неохлаждаемых микроболометров для регистрации импульсного терагерцевого и инфракрасного излучения // Журнал технической физики, 2022. — Т. 92. — Вып. 3. — С. 443–452.

УДК 621.396

Способ визуализации источников терагерцевого излучения**Наумов А. В.¹, Старцев В. В.², Жернаков А. С.³, Шаров А. А.⁴, Моисеев М. В.⁴**¹ АО «ОКБ «Астрон»

140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1

magr829@yandex.ru

² Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

orion@orion-ir.ru

³ ООО «ТЕРА»

142300, г. Чехов, ул. Земская, 4

H89268337078@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет геодезии и картографии

105064, г. Москва, Гороховский пер., 4

njforok@outlook.com

Синтезированы металлоорганические комплексы для осуществления визуализации ТГц-излучения в ближней ИК-области спектра. Изготовлен конвертер. Для макетирования разработан и изготовлен объектив с линзами из фторопласта PTFE.

Ключевые слова: визуализация ТГц-излучения; антистоксовая люминесценция; активный слой конвертера; объектив.

Известным способом визуализации является нагревание за счет мощности ТГц-излучения активного слоя конвертера до температурного порога чувствительности ИК-камеры в диапазоне спектра 8–14 мкм. В монографии [1] говорится о том, что при поглощении красителем происходит переход пи-электрона с одной из заполненных орбит на расположенные выше валентные орбиты. В отличие от первых — связывающих, последние являются антисвязывающими или «разрыхляющими» для скелета молекулы. При этом нарушается правило Стокса, так как испускаются фотоны, по величине превышающие поглощенные. Такие частоты спектра носят название антистоксовых.

Синтезируя металлоорганические комплексы на основе тионина и фталоцианинов, благодаря эстафетной сенсбилизации будет осуществляться визуализация в ближней ИК-области спектра 0,7–1,1 мкм. Если с помощью ТГц-излучения уменьшать вероятность безызлучательных переходов с ростом запаса колебательной энергии возбужденных молекул в активном слое приемника изображений, то возможно получение градиентов яркости люминесцентного свечения, достаточного для цифровой регистрации изображений на обычную КМОП-матрицу в спектральном диапазоне 0,7–1,1 мкм. Повышение эффективности преобразования ТГц-излучения в ИК-излучение в спектральном диапазоне 0,7–1,1 мкм повысит и чувствительность приемника изображений, так как для наночастиц будет требоваться меньше ТГц-мощности, чем для нагрева до температурного порога чувствительности тепловой ИК-камеры в диапазоне спектра 8–14 мкм.

Для макетирования разработан и изготовлен объектив с линзами из фторопласта PTFE. Параксиальные характеристики объектива следующие: $F' = 100$ мм, $F/\# = 0,8$. На рис. 1 представлена фотография объектива.



Рис. 1. Фотография объектива

Работа проводилась при поддержке Фонда содействия инновациям

Литература

1. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений: Монография академика А. Н. Теренина. — Ленинград: Наука, 1967. — 616 с.

УДК 538.975

Рост аморфного оксида ванадия при реактивном электронно-лучевом испарении и характеристика скорости отклика резистивных фоточувствительных элементов

Кунцевич А. Ю., д. ф.-м. н., Таркаева Е. В., Блуменау М. И., Иевлева В. А., Дулебо А. И.

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

alexkun@lebedev.ru

Сообщается о росте пленок аморфного VO_x при низких температурах с малым количеством технологических параметров. Для их аттестации разработан метод «накачка — зондирование», который позволяет изучать релаксацию сопротивления после воздействия лазерного импульса и устанавливать ограничения на быстродействие.

Ключевые слова: болометрические материалы; оксиды ванадия; тонкие пленки; накачка — зондирование; фотоотклик.

Фоточувствительные резисторы используются в термометрах и микроболометрах. Электронная система быстро реагирует на излучение, быстродействие же резистивных элементов ограничено схемой считывания, емкостью, релаксацией тепла и электронной системы. Для исследования быстродействия материала необходим метод аттестации скорости резистивного отклика.

Нами была разработана методика типа «оптическая накачка — электрическое зондирование» для измерения отклика сопротивления на излучение. Лазерный импульс воздействует на образец, после чего при пропускании электрического импульса наносекундной длительности с заданным временем задержки τ через образец, согласованный на 50 Ом, при помощи осциллографа измеряется коэффициент прохождения, связанный с сопротивлением R . Зависимость $R(\tau)$ позволяет найти время релаксации системы. Например, для аморфного VO_x при $T = 300$ К на подложке Al_2O_3 это время составляет порядка микросекунд. Метод может найти применение для аттестации фотопроводящих детекторных материалов.

Аморфный VO_x — основной материал неохлаждаемых болометров с сильной зависимостью $R(T)$, но при этом не имеющий гистерезисного фазового перехода, свойственного кристаллическим VO_x [1]. Основным показателем качества пленки является температурный коэффициент сопротивления, ТКС, значение которого в приборах — от -3 до -1% /К. До сих пор аморфные пленки VO_x получались реактивным магнетронным напылением, что требовало стабилизации ряда техпараметров: давления, соотношения Ar и O_2 в смеси, состава мишени, типа подложки, тока разряда, температуры подложки.

Нами было предложено выращивать аморфные пленки VO_x путем реактивного e-beam-распыления V в атмосфере O_2 . ТКС пленок доходил до $-2,5\%$ /К, процесс соответствовал требованиям для создания микроболометрических матриц. Преимущество метода — воспроизводимость и малое количество техпараметров.

Литература

1. Su Y.-Y., Cheng X.-W. et al. Evolution of microstructure in vanadium oxide bolometer film during annealing process // Appl. Surf. Sci., 2015. Vol. 357. Part A. P. 887–891.



УДК 621.383.525

Барьерно-диодные гетероструктуры на основе соединений A^3B^5 , содержащих сурьму

Кривобок В. С.^{1,2}, Клековкин А. В.¹, Савин К. А.¹, Минаев И. И.¹, Ерошенко¹, Аминев^{1,2}, Пашкеев Д. А.¹, Ченцов С. И.^{1,2}, Гончаров А. И.², Николаев С. Н.¹

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

office@lebedev.ru

² АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

orion@orion-ir.ru

Разработана технология эпитаксиального роста барьерно-диодных гетероструктур на основе соединений A^3B^5 , содержащих сурьму и предназначенных для создания на их основе матричных фотоприемных устройств MWIR- и LWIR-спектральных диапазонов.

Ключевые слова: квантоворазмерная гетероструктура; фотоприемное устройство; MWIR и LWIR; xVn.

Высокочувствительные матричные фотоприемные устройства (МФПУ) MWIR- и LWIR-диапазонов, в том числе адаптированные для работы в окнах прозрачности атмосферы, оказываются все более востребованными как для ряда гражданских применений, так и для нужд отечественного ВПК. Среди активно используемых за рубежом МФПУ, которые не производятся в РФ, стоит особенно упомянуть детекторы с барьерно-диодной (xVn) архитектурой. При сравнительно простоте данная архитектура позволяет значительно уменьшить темновые токи, связанные с механизмом Шокли—Рида—Холла, и, таким образом, радикально увеличить чувствительность фотоприемного устройства. Кроме этого, xVn-архитектура делает возможной стабильную работу устройства при повышенных температурах, что существенно снижает требования к системе охлаждения. Последнее играет решающее значение при создании МФПУ, работающих в составе автономных систем, для которых существенную роль играют низкое энергопотребление и массогабаритные характеристики. Разработка отечественных аналогов МФПУ барьерно-диодного типа является одним из важнейших этапов достижения технологического суверенитета страны в области ИК-фотосенсорике.

В данной работе приводятся последние результаты Лаборатории новых материалов для ИК-фотоники, созданной в ФИАН для развития электронной промышленности в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты» и ориентированной на разработку фоточувствительных гетероструктур A^3B^5 с барьерно-диодной архитектурой. Данные гетероструктуры предназначены для создания на их основе МФПУ, работающих в ИК-окнах прозрачности атмосферы. Для получения барьерно-диодных гетероструктур используется молекулярно-пучковая эпитаксия соединений A^3B^5 , содержащих сурьму.

В качестве наиболее перспективного решения для спектрального диапазона 3–5 мкм выбраны эпитаксиальные слои In(As)Sb толщиной 1,5–2 мкм (поглощающий слой) в сочетании с барьерным слоем InAlSb толщиной ~0,1 мкм и верхним

контактным слоем In(As)Sb. Слои In(As)Sb легируются теллуром для получения проводимости *n*-типа. Таким образом реализуется In(As)Sb/InAlSb/In(As)Sb-гетероструктура с униполярным барьером (для электронов) в слое InAlSb. Дизайн гетероструктуры позволяет подавить темновой ток, связанный с механизмом Шокли—Рида—Холла, и, таким образом, заметно повысить удельную обнаружительную способность фоточувствительного материала. В ФИАН отрабатывается как технология подготовки InSb-подложек, так и весь последующий технологический цикл, необходимый для получения барьерно-диодных гетероструктур.

В отличие от твердых растворов CdHgTe, в системе A^3B^5 нет достаточно узкозонных соединений, которые могли бы быть использованы в качестве поглотителя для спектрального диапазона 8–12 мкм. Тем не менее данная проблема может быть решена за счет создания искусственных материалов на основе InAs/GaSb-сверхрешеток. Данные сверхрешетки представляют собой набор чередующихся туннельно-прозрачных слоев InAs и GaSb, в которых эффективная ширина запрещенной зоны определяется квантоворазмерными эффектами. Поэтому изменение толщин слоев InAs и GaSb позволяет менять эффективную ширину запрещенной зоны практически от нуля до 0,724 эВ (объемный GaSb). За счет дизайна InAs/GaSb-интерфейсов сверхрешетка может быть согласована по постоянной решетки с GaSb-подложкой, а использование более широкозонных материалов, например твердого раствора AlGaSb, позволяет реализовать барьерно-диодную *nVn*-гетероструктуру, в которой для получения *n*-типа проводимости используется примесь теллура.

На данный момент в ФИАН получены образцы короткопериодных сверхрешеток, адаптированных для детектирования излучения LWIR-диапазона, и ведутся работы по созданию фотоприемных устройств с барьерно-диодной архитектурой на их основе.



УДК 621.383.8

Микроканальные электронные усилители: принцип работы и сферы применения

Кривов С. В.

ООО ВТЦ «Баспик»

362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, корп. 6

baspik-nano@yandex.ru

Ключевые слова: многоканальные электронные усилители (МЭУ); детекторы.

В докладе освещены новейшие разработки ООО Владикавказского технологического центра «Баспик» в области многоканальных электронных усилителей (МЭУ) и детекторов на их основе. Представлен модельный ряд продукции с описанием их технических характеристик и сфер применения. В настоящий момент детекторы на основе МЭУ нашли самое широкое применение в различных сферах науки и техники, таких как исследования в области ядерной физики, масс-спектрометрии, техники для космических исследований, медицины, электронной микроскопии и т.д.

За последнее время разработаны и освоены детекторы для времяпролетной масс-спектрометрии, квадрупольной масс-спектрометрии, рентгеновской спектрометрии, детекторы ультрафиолетового и видимого излучения, детекторы для диагностики профиля пучка заряженных частиц в ускорителях и т.д.

В докладе сделан акцент на возможности и необходимости импортозамещения широкой номенклатуры изделий на основе МЭУ на российском рынке.

УДК 621.3.049.779

Лабораторное оборудование для литографии и работы с двумерными вандерваальсовыми гетероструктурамиГалиуллин А. А.^{1,2}, Пугачёв М. В.¹, Дулебо М. И.¹, д. ф.-м. н. Кунцевич А. Ю.¹¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

1233550v@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

Разработаны и продемонстрированы бюджетные лабораторные установки для проведения безмасочной оптической литографии с разрешением до нескольких микрон на основе DMD-матрицы, масочной оптической литографии с разрешением до 1 мкм, а также установки для переноса вандерваальсовых гетероструктур.

Ключевые слова: фотолитография; литография; графен; вандерваальсовы гетероструктуры; двумерные материалы; новая электроника.

Фотолитография является одним из основных инструментов производства микро- и макроструктур в промышленных количествах: процессоров [1], линз [2], LED-дисплеев [3], 3D-структур [4] и т.д. Недорогой компактный и быстрый процесс литографии требуется в исследованиях новых материалов, в частности двумерных вандерваальсовых гетероструктур, примерами которых являются структуры из графена, нитрида бора (hBN), сульфида молибдена (MoS₂) и других. Успехи в промышленном производстве графена [5] и других двумерных материалов позволяют создавать оптоэлектронные [6], магнитные [7] и сверхпроводящие [8] устройства на принципах, недоступных классическим трехмерным материалам.

Цены на масочные, лазерные и тем более электронные литографы высоки и начинаются от ~10–100 млн руб. [10, 11]. Эти литографы рассчитаны на проведение литографии на больших подложках размером 2"–6", а поэтому имеют дорогие системы позиционирования и засветки, обеспечивающие равномерность литографии по всей большой подложке. Для исследования свойств новых материалов обычно требуется быстро и многократно проводить литографию на образцах площадью не более ~1×1 см², что делает использование коммерчески доступных в мире литографов нецелесообразным.

В данной работе описываются прототипы лабораторных установок проекционной и масочной литографии [12] микронного разрешения, а также установки по созданию вандерваальсовых гетероструктур [13].

В качестве динамически-перестраиваемой маски на безмасочном варианте литографа используется DMD-чип (Digital Micromirror Device), проецируемый на объект литографии при помощи объектива микроскопа, см. рис. 1. Технология проекционной литографии позволяет производить засветку на площади ~300×300 мкм² с микронной точностью. Используемые моторизованные подставки позволяют производить литографию на площади ~5×5 см².

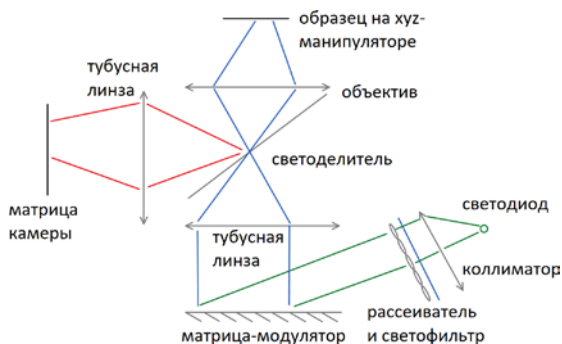


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема работы безмасочного литографа

Установка масочной литографии использует заранее изготовленные на лазерном или безмасочном литографе хромовые маски, приводимые в контакт с объектом литографии. Площадь литографии данной установки составляет около $1 \times 1 \text{ см}^2$, разрешение — около 1 мкм, см. рис. 2.

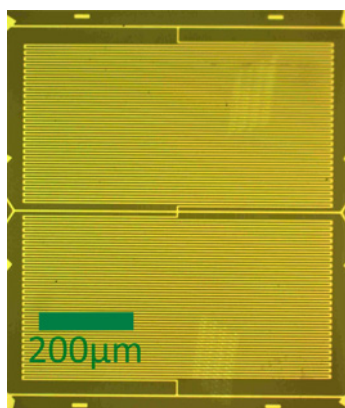


Рис. 2. Фотография алюминиевой структуры, полученной при помощи масочного литографа. Общая площадь структуры (в том числе вне кадра) составляет $3 \times 5 \text{ мм}^2$

Обе литографические установки имеют точность совмещения в несколько мкм, процесс одной засветки занимает около 1 секунды.

Установка сборки вандерваальсовых гетероструктур в данной работе совмещена с масочным литографом, как показано на рис. 3, а все критические позиционеры моторизованы и управляются программой. Компактность и многофункциональность данной установки позволяют использовать ее в небольшом перчаточном боксе с инертной атмосферой для работы с неустойчивыми в кислородной атмосфере двумерными материалами типа черного фосфора.

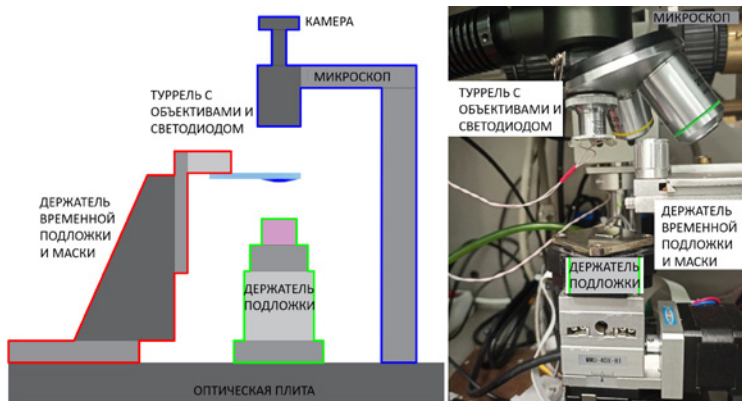


Рис. 3. Схема и фотография установки переноса и масочной литографии

Литература

1. Chang Kuei-Sung and Tanaka Shuji and Esashi Masayoshi. A micro-fuel processor with trench-refilled thick silicon dioxide for thermal isolation fabricated by water-immersion contact photolithography // *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015. 15, 9. S171–S178.
2. Haruna Masamitsu, Takahashi Masanobu, Wakahayashi Kohji and Nishihara Hiroshi // *Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses* // *Appl. Opt.*, 1990. 29. 5120–5126.
3. Mei W., Zhang Z., Zhang A. et al. High-resolution, full-color quantum dot light-emitting diode display fabricated via photolithography approach // *Nano Res.*, 2020. 13. 2485–2491.
4. Jing Zhang and Pu Xiao. 3D printing of photopolymers // *Polym. Chem.*, 2018. 9, 13. 1530–1540.
5. Оборудование для синтеза наноматериалов. — <https://www.rusgraphene.ru/equipment> (дата обращения: 17.08.23).
6. Wang Q., Kalantar-Zadeh K., Kis A., Coleman J. N., Strano M. S. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides // *Nat. Nanotechnol.*, 2012. 7. 699–712.
7. Gibertini M., Koperski M., Morpurgo A. F., Novoselov K. S. Magnetic 2D materials and heterostructures // *Nat. Nanotechnol.*, 2019, 14, 408–419.
8. Qiu D., Gong C., Wang S., Zhang M., Yang C., Wang X., Xiong J. Recent Advances in 2D Superconductors // *Adv. Mater.*, 2021. 33, 2006124.
9. Suss MJB4 Mask Aligner. — <https://www.suss.com/en/products-solutions/mask-aligner/mjb4> (дата обращения: 17.08.23).
10. Midas System MDA-400LJ Mask Aligner. — http://www.midas-system.com/en/product/menu_01.html (дата обращения: 17.08.23).
11. Pugachev M. V., Duleba A. I., Galiullin A. A., Kuntsevich A. Y. Micromask Lithography for Cheap and Fast 2D Materials Microstructures Fabrication // *Micromachines*, 2021. 12, 850.
12. Martanov S. G., Zhurbina N. K., Pugachev M. V., Duleba A. I., Akmaev M. A., Be-lykh V. V., Kuntsevich A. Y. Making van der Waals Heterostructures Assembly Accessible to Everyone // *Nanomaterials*, 2020. 10, 2305.



УДК 621.3.049

Печатные фотодетекторы для матричных ФПУ большой площади

Санджиева М. А.^{1,2}, Алешин Д. К.^{1,2}, Даниловский Э. Ю.¹, Куприянова К. И.³,
Каргапольцев С. В.³, Новоселов П. А.³

¹ Университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, литер А
maria.sandzhiyeva@itmo.ru

² ООО «ДиАйПи»

188300, г. Гатчина, Пушкинское ш., 20, корп. 1

³ ООО «Артек Электроникс»

108841, г. Москва, г. Троицк, ул. Промышленная, 2Б

Разработан матричный фоточувствительный сенсор большой площади на основе технологии тонкопленочных фотодиодов и транзисторных матриц с InGaZnO-полупроводниковым слоем. Показаны варианты создания датчиков отпечатка пальца с применением тонкопленочных транзисторных матриц и органических фотодиодов разной площади и разрешения до 500 ppi.

Ключевые слова: OPD; органические фотодетекторы; датчики отпечатка пальца; тонкопленочные фотоприемники; матричные фотоприемники; MOSTFT.

Коммерческое использование тонкопленочных аморфных полупроводников уже началось и активно развивается на примере органических светодиодов OLED. Интеграция органических и перовскитных полупроводников в устройства для детекции оптических сигналов может расширить классическое представление и области применения фотоприемников [1].

Тонкопленочные транзисторы (ТПТ) на основе смешанного оксида индия — галлия — цинка IGZO представляют большой интерес для устройств с активной матричной адресацией. В работе исследовано влияние температуры отжига смешанного оксида InGaZnO (IGZO) на стабильность транзисторных характеристик ТПТ. Также была разработана топология плоскостанельной транзисторной матрицы с размером пикселя 50 мкм дизайна 1T1C. Полученные ТПТ матрицы были использованы для интеграции с тонкопленочным фотодиодным слоем, который был нанесен при помощи растворных технологий. В качестве основных методов печати фотодиодного слоя применяли метод лезвийного нанесения (Dr. Blade) и метод центрифугирования.

Архитектура тонкопленочных фотодиодов — ИТО/ЭТС/ФАС/ДТС/Ag. Для ЭТС исследовали пленки оксида InGaZnO толщиной от 7 до 20 нм, полученные магнетронным напылением из керамической мишени InGaZnO₄ (In:Ga:Zn 1:1:1). Ширина запрещенной зоны a-IGZO — 3,05–3,2 эВ, высокая прозрачность (более 80%) в видимом диапазоне делает этот материал перспективным материалом для ЭТС.

Достигнутые рабочие показатели матричного фотоприемника представлены ниже:

- частота кадровой развертки (минимальная) 1–10 Гц;
- отношение сигнал/шум не менее 46 дБ;
- динамический диапазон не менее 180.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ (грант № 22-79-00137)

Литература

1. Simone G., Dyson M. J., Meskers S. C. J., Janssen R. A. J., Gelinck G. H. // Adv. Funct. Mater., 2020. 30, 1904205.
2. Kimizuka N., Mohri T. // J. Solid State Chem., 1985. 60. 382–384.



УДК 621.383

Получение высокочувствительных пленок PbSe для фотоприемников ИК-излучения

Мочалов Л. А.^{1,2}, Кудряшов М. А.^{1,2}, Прохоров И. О.^{1,2}, Вшивцев М. А.²,
Слаповская Е. А.¹, Мирошников Б. Н.,³ Мирошникова И. Н.³

¹ ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

kudryashov@phys.unn.ru

² Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Разработана технология химического осаждения из газовой фазы высокочувствительных пленок селенида свинца, где в качестве исходных компонентов используются элементарные свинец и селен, а также оксид селена и иодид свинца. Выполнена сенсбилизация пленок PbSe, изучено влияние отжига на фоточувствительные свойства.

Ключевые слова: PbSe; фотодетектор; ИК-излучение.

Введение

Селенид свинца (PbSe) считается весьма перспективным материалом, который может быть использован в неохлаждаемых чувствительных детекторах ИК-излучения в диапазоне 1–5 мкм. С возрождением спроса на неохлаждаемые системы формирования изображений в средневолновом инфракрасном диапазоне существует потребность в лучшем понимании процесса сенсбилизации PbSe, используемого для фотопроводящего обнаружения. Окисление с последующим йодированием значительно улучшает фотоотклик тонкой пленки PbSe, но механизм его не совсем ясен. Сочетание кислорода и йода в тонких пленках PbSe является важным условием [1, 2]. Также считается, что контролируемое образование селенида свинца (PbSeO₃) обеспечивает фотоотклик, в то время как йод влияет на рекристаллизацию зерен PbSe, снижает энергию активации в образовании PbSeO₃, а также может вносить вклад в фотоотклик [3, 4]. Исходя из этого нами были получены пленки PbSe химическим осаждением из газовой фазы элементарных свинца и селена, а также оксида селена и иодида свинца.

Осаждение пленок PbSe и их фотоочувствление

В данной работе тонкие пленки состава PbSe были получены прямым химическим взаимодействием паров свинца и селена. Также в некоторых экспериментах в процесс осаждения были добавлены пары оксида селена или иодида свинца либо оба указанных компонента. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Данная установка состоит из системы подачи исходных веществ (Pb, Se, PbI₂, SeO₂), кварцевого реактора и системы откачки. Система подачи включает в себя печи с исходными веществами, нагреваемые газовые линии с аргоном и регуляторы расхода газов. Аргон высокой чистоты используется для транспортировки прекурсоров в зону реакции. Подложки размером 10×10 и 25×25 мм² помещаются в реактор через загрузочный вакуумный фланец из нержавеющей стали и устанавливаются

на специальном перемещаемом охлаждаемом/нагреваемом подложкодержателе. Процесс осаждения проводится при давлении 0,1 торр.

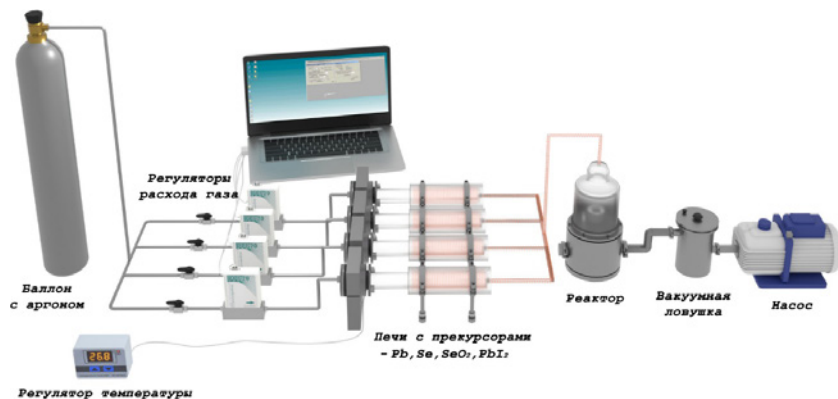


Рис. 1. Принципиальная схема установки осаждения пленок

Сенсибилизация пленок PbSe осуществлялась в две стадии. На первой стадии проводили термический отжиг на воздухе при температуре 460 °С, за которой следовала вторая термическая стадия йодирования, проводимая при более низкой температуре 325 °С.

На рис. 2 изображены осажденные пленки PbSe до (нижний образец) и после фотоочувствления. Золотые контакты использовали для измерения фотоэлектрических свойств при напряжении смещения 50 В и частоте модуляции 400 Гц (табл. 1). Видно, что одновременное введение оксида селена и иодида свинца в процесс осаждения существенно увеличивает фоточувствительность конечных пленок.

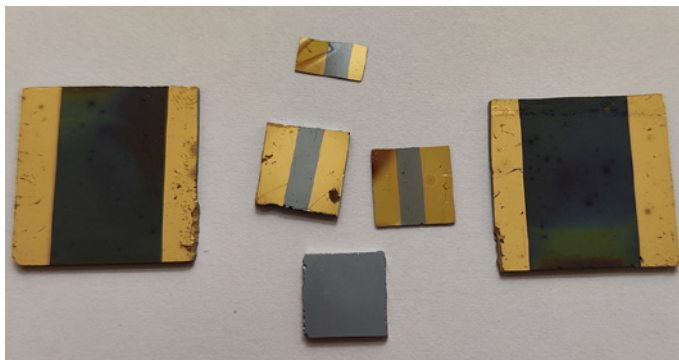


Рис. 2. Фотография полученных образцов

Таблица 1. Фотоэлектрические измерения

Прекурсоры при осаждении	R, МОм	U _ш , мкВ	U _с /U _ш
Pb+Se	10	8	1,5
Pb+Se+ SeO ₂	3,5	6	3
Pb+Se+PbI ₂	20	10	0,1
Pb+Se+PbI ₂ +SeO ₂	6,3	4	30

Заключение

Показана возможность использования метода химического осаждения из газовой фазы свинца, селена, оксида селена и иодида свинца для получения фоточувствительных пленок PbSe. Все полученные образцы обладают равномерным распределением элементов по поверхности. Процессы отжига на воздухе и йодирование способствуют фотоочувствлению пленок. Однако изначальное введение оксида селена и иодида свинца в процессе осаждения значительно увеличивает фоточувствительность. Мы предполагаем, что это происходит за счет более равномерного распределения кислорода и йода в объеме пленок.

Литература

1. Jang M.-H. et al. Photoconductive mechanism of IR-sensitive iodized PbSe thin films via strong hole—phonon interaction and minority carrier diffusion // Appl. Opt, 2020. Vol. 59. P. 10228–10235.
2. Jang M. H. et al. Electrical transport properties of sensitized PbSe thin films for IR imaging sensors // Semicond. Sci. Technol, 2019. Vol. 34. P. 065009.
3. Голубченко Н. В. и др. Исследование микроструктуры и фазового состава поликристаллических слоев селенида свинца в процессе термического окисления // Физика и химия стекла, 2006. — Т. 32. — № 3. — С. 464–478.
4. Голубченко Н. В. и др. Влияние примесей на кинетику и механизм термического окисления поликристаллических слоев PbSe // Неорганические материалы, 2006. — Т. 42. — № 9. — С. 942–950.

УДК 621.737.826

Технологические направления разработок полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 для решения задач оптоэлектроники

Пихтин Н. А.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
nike@hpld.ioffe.ru*

Рассмотрены современные тенденции в области разработок и исследований полупроводниковых лазеров и фотоприемников ближнего ИК-диапазона длин волн. Будут представлены последние результаты, достигнутые как в России, в том числе в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, так и в мире.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия; молекулярно-пучковая эпитаксия; торцевые лазерные диоды; вертикально-излучающие лазеры.

Будут обсуждаться конструкции торцевых (с резонатором Фабри—Перо) лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур из Al-In-Ga-As-P твердых растворов, выращенных на подложках GaAs (диапазон длин волн излучения 630–1100 нм) [1–5] и InP (диапазон длин волн излучения 1260–2000 нм) [6, 7] методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). Главное внимание будет уделено требованиям к их основным выходным электрооптическим характеристикам — оптической мощности, КПД, расходимости, спектральной и пространственной яркости, температурной стабильности, надежности (срок службы) — в зависимости от конкретных применений. В этой связи будут рассмотрены технологические процессы эпитаксиального роста гетероструктур, их постростовой обработки (планарные технологии), технологии монтажа кристаллов и их характеризации. Будут приведены достигнутые выходные параметры разработанных и изготовленных многомодовых и одномодовых торцевых полупроводниковых лазеров, работающих при непрерывной и импульсной (длительность от 1 до 100 нс) накачке [1–7].

Будут представлены результаты разработок в области создания вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) на основе InGaAs/AlGaAs-гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В частности, будут продемонстрированы характеристики высокоскоростных (>25 Гбит/с) ВИЛ спектрального диапазона 850 нм, одномодовых ВИЛ для спектрального диапазона 9XX нм и ВИЛ для атомных сенсоров на атомах ^{133}Cs . Созданные лабораторные ВИЛ спектрального диапазона 894,6 нм при рабочих температурах до +70 °С демонстрируют суб-миллиамперные пороговые токи, максимальную выходную мощность до 2,5 мВт, одномодовую генерацию с фактором подавления мод высшего порядка более 30 дБ и фиксированное направление линейной поляризации выходного излучения с фактором подавления ортогональной поляризации ~20 дБ [8, 9]. По своим характеристикам разработанные приборы не уступают лучшим мировым аналогам и прошли успешную предварительную апробацию для использования в компактных квантовых стандартах частоты и перспективных ядерных магнитных гироскопах.

Литература

1. Шамахов В. В. и др. // *Technologies*, 2023. Vol. 11. 4, ArtNo: 389.
2. Золотарев В. В. и др. // *Квант. электрон.*, 2022. — 52 (10). — С. 889–894.
3. Шашкин И. С. и др. // *ФТП*, 2020. — 54 (4). — С. 408–413.
4. Veselov D. A. et al. // *Semicond. Sci. Technol.*, 2021. 36 (11), ArtNo: 115005.
5. Гаврина П. С. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (2). — С. 129–132.
6. Волков Н. А. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (4). — С. 283–286.
7. Святогорov В. Н. и др. // *Квант. электроника*, 2021. — 51 (10). — С. 909–911.
8. Maleev N. A. et al. // *GyroscoPy and Navigation*, 2018. 9, 177–182.
9. Blokhin S. A. et al. // *Quantum Electronics*, 2019. 49, 187.

УДК 621.373.826

Мощные полупроводниковые лазеры, фотоприемники и оптоэлектронные модули на их основе

Ладугин М. А.

АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»

117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

maximladugin@mail.ru

Представлены разработки полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур A^3B^5 , в результате которых созданы мощные лазерные излучатели (диоды, линейки и решетки) и фотоприемные устройства, работающие в инфракрасном спектральном диапазоне от 0,8 до 12 мкм. Продемонстрированы ключевые параметры оптоэлектронных модулей.

Ключевые слова: SpaceWire; RMAP; СТП-ИСС; бортовые сети космических аппаратов.

Существует широкий комплекс задач современной оптоэлектроники (передача и прием информации, оптическая накачка, детектирование, спектроскопия), который для своего решения требует создания мощных полупроводниковых излучателей и фотоприемников, работающих в ближнем и среднем ИК-диапазоне. Создание указанных приборов возможно посредством формирования квантоворазмерных гетероструктур GaAsP/GaInP/GaAs, InGaAs/InAlAs/InP и GaAs/AlGaAs/GaAs, функционирующих на межзонных или межподзонных переходах [1–3]. Практическая реализация данных подходов возможна только при разработке эпитаксиальной технологии получения гетероструктур, квантовых ям и сверхрешеток с заданными параметрами. Показано, что от правильно выбранной конструкции и технологии получения зависят выходные характеристики создаваемых приборов. Одним из ведущих методов получения полупроводниковых гетероструктур является МОС-гидридная эпитаксия. Большая гибкость в выборе исходных материалов, широкий диапазон варьирования параметров роста, возможность получения резких гетерограниц и сверхтонких слоев, хорошая масштабируемость процесса роста и низкая себестоимость единицы изделия делают этот метод незаменимым при организации промышленного производства.

В работе представлены результаты создания современных типов полупроводниковых лазеров и фотоприемников, обсуждены особенности получения гетероструктур и активных элементов для рассматриваемых приборов, работающих в спектральных диапазонах 0,8–1,1, 1,3–2,0 и 4–12 мкм. Показано, что подходы к управлению положением уровней размерного квантования в квантовых ямах позволяют создавать методом МОС-гидридной эпитаксии фотоприемники и квантовые каскадные лазеры среднего ИК-диапазона с улучшенными характеристиками. Продемонстрировано успешное сочетание указанной нанотехнологии с другим методом — молекулярно-лучевой эпитаксией.

Продемонстрированы подходы к созданию мощных InGaAs-фотоприемников с однозарядным транспортом носителей в активной области. Такие приборы характеризуются более высокой (70 мВт) входной оптической мощностью, при которой происходит насыщение по сравнению с рпн-фотодиодами (12 мВт). В статье сообщается о разработке одночастотного излучателя на основе полупроводникового



лазерного диода с распределенной обратной связью с длиной волны излучения 1,55 мкм и мощностью на выходе волоконно-оптического кабеля не менее 50 мВт. На основе разработанных InGaAs/InP-гетероструктур представлены параметры приемо-передающих оптических модулей, предназначенных для использования в волоконно-оптических информационных системах передачи и преобразования информации.

Литература

1. Volkov N. A., Telegin K. Yu., Gultikov N. V. et al. Improvement of the current—voltage performance of broadened asymmetric waveguide InGaAs/AlGaAs/GaAs semiconductor lasers ($\lambda = 940\text{--}980\text{ nm}$) // *Quantum Electronics*, 2022. Vol. 52. № 2. P. 179—181.
2. Slipchenko S. O., Podoskin A. A., Veselov D. A. et al. Tunnel-Coupled Laser Diode Microarray as a kW-Level 100-ns Pulsed Optical Power Source ($\lambda = 910\text{ nm}$) // *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022. Vol. 34. № 1. P. 35—38.
3. Сабитов Д. Р., Рябоштан Ю. Л., Светогоров В. Н. и др. Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм на основе напряженно-компенсированных квантовых ям AlGaInAs/InP // *Квантовая электроника*, 2020. — Т. 50. — № 9. — С. 830—833.
4. Babichev A. V., Gladyshev A. G., Denisov D. V. et al. Heterostructures of quantum-cascade lasers with nonselective overgrowth by metalorganic vapour phase epitaxy // *Technical Physics Letters*, 2022. I. 15. P. 83—86.

УДК 621.396

Применение гиперспектральной информации в виде дополненной реальности

Агринский М. В., Попов В. К., Серов В. В.

АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1
magr829@yandex.ru

Описывается создание двухканального прибора, позволяющего получать синтезированное кадровое RGB-изображение объекта с дополненной реальностью в виде ГС-информации того же масштаба в формате 2D.

Ключевые слова: синтезированное изображение объекта; дополненная реальность; кадровая гиперспектральная информация; двухканального конструктива прибора.

Спектральные характеристики объекта непосредственно связаны со свойствами веществ и тем самым несут информацию о составе объекта, его структуре, состоянии и т. п. Зрительная система человека и RGB-камеры регистрируют видимый свет в трех перекрывающихся спектральных диапазонах, поступающая информация в которых интегрируется. В видимом диапазоне спектра регистрируемая информация об объектах, имеющих узкополосные спектральные свойства, может отображаться в виде шума, т. е. теряться. Объекты, излучающие или отражающие вне видимого диапазона спектра, естественно, не видны и не регистрируются RGB-камерами.

Гиперспектральная (ГС) съемка фиксирует отражательно-излучательные свойства объектов съемки в узких диапазонах электромагнитного спектра, т. е. производится массив монохроматических фотоизображений. В результате формируется гиперспектральное изображение объекта, которое позволяет точно идентифицировать его особенности, не видимые глазом и, соответственно, не регистрируемые на других камерах/снимках, преследующих цель соответствия фотоизображения зрительному восприятию. Большинство предлагаемых на рынке ГС-камер используют линейно-щелевой способ получения изображений объекта съемки, а именно изображение (1D) объекта, дополненное спектральной информацией (1D) по каждой пространственной координате [1]. Для получения кадрового (2D) изображения объекта требуется сканирование щелью объекта съемки с последующей «сшивкой» щелевых кадров с использованием специального ПО. Основным недостатком линейно-сканирующих систем — необходимость сканирования. Существующие в настоящее время кадровые системы ГС-съемки созданы только на базе бельгийской ИМЕС ПЗС-матрицы, имеющей значительные недостатки разного рода и ограничения в применении.

Основное преимущество кадровых систем заключается в том, что наблюдение объекта происходит в привычном 2D-формате без дополнительной программной обработки и без относительных динамических перемещений камеры и объекта. В АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН» завершаются работы по созданию двухканального прибора, позволяющего получать синтезированное кадровое RGB-изображение объекта с дополненной реальностью в виде ГС-информации того же масштаба в формате 2D, полученной в идентифицируемом



объектом любом спектральном диапазоне. Состав двухканального конструктива прибора состоит из обычной RGB-камеры и камеры на базе анаморфной оптики для получения кадровой ГС-информации об объекте на обычной монохромной КМОП-матрице в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Для получения дополненной ГС-информации в иных спектральных диапазонах создаются соответствующие камеры с оригинальными объективами и доступными матричными приемниками изображений.

Литература

1. Родионов И. Д., Родионова А. И., Калинин А. П., Егоров В. В. Многофункциональный гиперспектрометр для зондирования земной поверхности. Патент № 121366. — Опубликовано 20.10.2012. Бюлл. № 29. — 10 с.

УДК 621.382.323

Разработки НИЯУ МИФИ в области интегральной фотоники и СВЧ электроники

Каргин Н. И., Гусев А. С., Васильевский И. С., Рыжук Р. В.*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**115409, г. Москва, Каширское ш., 31**nikargin@mephi.ru*

Представлены результаты исследований и разработок НИЯУ МИФИ в области интегральной фотоники и СВЧ электроники, включающие в себя технологии компонентной базы радиوفотоники, технологии СВЧ НЕМТ на основе соединений $A^{III}N$ и $A^{III}As$, а также радиофотонные методы построения радиоизображений.

Ключевые слова: интегральная радиوفотоника; СВЧ-транзистор; гетероструктура; интегральная схема.

Введение

Компонентная база радиوفотоники и СВЧ электроники предназначена для применения в устройствах приема-передачи информации, системах спутниковой связи, радарх, базовых станциях, включая технологии 5G и 6G. Радиофотонные устройства позволяют существенно снизить потери при распространении широкополосных сигналов, особенно в распределенных системах, а компонентная база СВЧ электроники на основе соединений $A^{III}N$ и $A^{III}As$ позволяет расширить полосу частот передаваемых сигналов, мощность устройств и снизить уровень шумов в приемных трактах.

Интегральная фотоника

Разработан новый подход по квантовому дизайну конструкций многослойных наногетероструктур InAlGaAs на подложке InP для увеличения электрооптического эффекта за счет использования асимметрии, туннельных эффектов и управляемой гибридизации дырочных состояний в структурах с напряженными нанослоями. Впервые предложены конструкции структур, обеспечивающие увеличение электрооптического эффекта до двух раз по сравнению с лучшими известными структурами и до шести раз по сравнению с наиболее распространенными конструкциями.

Предложена многомасштабная численно-аналитическая модель интегрального электрооптического модулятора Маха—Цендера с учетом взаимодействия электрической, оптической и СВЧ-подсистем, обеспечившая путем итерационной оптимизации проектирование топологии модулятора в геометрии сегментированных электродов бегущей волны с шириной полосы модуляции более 30 ГГц.

Получены результаты экспериментальных исследований амплитудно-фазового распределения поля с использованием радиофотонного тракта на основе дискретных элементов в диапазоне частот до 10 ГГц для построения радиоизображений объектов.

Компонентная база СВЧ электроники

Разработаны технологии формирования гетероэпитасиальных структур (ГС) на основе соединений $A^{III}N$, содержащие ультратонкий барьер (≈ 5 нм), с использованием



метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Слоеое сопротивление оптимизированных ГС составило менее 230 Ом/□ [1].

На основе экспериментальных ГС были изготовлены тестовые СВЧ-транзисторы с затвором Шоттки ($L_g = 250$ нм). Анализ характеристик изготовленных приборов показал, что они имеют максимальный ток насыщения стока до 1,4 А/мм, а предельные частоты усиления по току f_t и мощности f_{max} достигают 50 и 80 ГГц соответственно.

Разработаны технологии роста псевдоморфных гетероструктур $A^{III}As$ с односторонним легированием, обладающие значениями подвижности электронов в канале $6900 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при комнатной температуре и $22800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при температуре 77 К [2].

На основе указанных гетероструктур разработана технология транзисторов с Т-образным затвором с топологической нормой 0,15 мкм. Максимальная частота генерации f_{max} составила более 120 ГГц, минимальный коэффициент шума на частоте 12 ГГц не превышал 1,3 дБ. Разработаны технологический процесс и библиотека элементов для изготовления МИС МШУ на основе $A^{III}As$ на диапазон частот 8,5–12 ГГц с коэффициентом усиления более 20 дБ и коэффициентом шума менее 1,8 дБ.

Заключение

Представлены результаты исследований и разработок НИЯУ МИФИ в области интегральной фотоники и СВЧ электроники, в том числе технологии изготовления активной и пассивной компонентной базы радиофотоники на основе соединений $A^{III}B^V$ диапазонов частот более 30 ГГц, технологии ГС соединений $A^{III}N$ и 0,25 мкм НЕМТ-транзисторов на их основе для мощной СВЧ электроники, технологии гетероэпитаксиальных структур соединений $A^{III}As$ и 0,15 мкм НЕМТ-транзисторов на их основе для маломощнейшей СВЧ электроники и др.

Литература

1. Гусев А. С. и др. Получение и исследование III-нитридных НЕМТ гетероструктур с ультратонким барьером AlN // 14-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники: сборник трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2023. — С. 29–30.
2. Васильевский И. С. и др. Разработка отечественного техпроцесса 0,15 мкм РНЕМТ для МИС СВЧ МШУ // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. — Омск, 26–27 апреля 2022 года. — С. 75–83.

УДК 621.3.049.779

Специальная элементная база для технологии гетерогенной сборки фотонных интегральных схем

Ковалев А. А., Певчих К. Э., Светиков В. В.

*АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
pevchikh@zntc.ru*

Описывается соединение элементов фотонных интегральных схем (ФИС), произведенных в различных технологических процессах методом гетерогенной интеграции. Потребовались фундаментальные изменения конструкции активных и пассивных оптических элементов по сравнению с технологией гибридной интеграции.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; гетерогенная сборка; бондинг.

Введение

В РФ на сегодняшний день ведутся работы по проектированию кристаллов фотонных интегральных схем различного применения на различных материальных платформах, но технология их промышленной сборки, измерений и испытаний отсутствует ПОЛНОСТЬЮ. Наличие такой технологической платформы позволит всем разработчикам фотонных интегральных схем сосредоточиться на их функциональных характеристиках, а окончательная сборка станет возможна на индустриальной основе.

Гетерогенная сборка ФИС требует фундаментальных изменений в элементах фотоники

Основная задача современного подхода к групповым операциям сборки ФИС — это разработка технологии изготовления самих элементов, ориентированных на гетерогенное соединение. Это фундаментальное изменение конструкции и технологий. Традиционные подходы, основанные на последовательном росте структур данных различных материальных систем при создании надежных и эффективных лазерных источников, имеют фундаментальные ограничения, не позволяющие воспользоваться ими.

В работе освещены результаты освоения ключевых элементов современных технологий сборки ФИС. К настоящему времени в технологиях мировой индустрии фотонных интегральных схем определились два лидера — технологии на основе элементов A^3B^5 и кремниевая технология. В связи с этим в последнее десятилетие в мировой фотонной индустрии возникла тенденция к совмещению технологий A^3B^5 и Si [1–5]. Проблемой совмещения этих двух технологических линеек является сильное различие в кристаллических решетках. К настоящему времени разработаны различные способы интеграции лазеров (A^3B^5) с Si-планарными волноводными структурами.

Наиболее современный — это интеграция светоизлучающих структур на основе A^3B^5 с Si-волноводной структурой методом склеивания (бондинга) пластин. Для склеивания можно использовать типовые инструменты с низкой точностью выравнивания и высокой производительностью. Процесс бондинга бывает двух

типов: склеивание без промежуточного слоя и со склеиванием промежуточного слоя. Для ФИС часто используют склеивание с использованием полимеров, таких как BCB и SU-8.

Заключение

Основная проблема групповых операций гетерогенной сборки ФИС — это необходимость разработки самих элементов, ориентированных на гетерогенное соединение. Это фундаментальное изменение конструкции и технологий. Полученные результаты таких разработок подтвердили правильность новых конструкций.

Литература

1. Liang Di and Bowers John E. Recent Progress in Heterogeneous III-V-on-Silicon Photonic Integration // *Light: Advanced Manufacturing* (2021) 2:5.
2. Liu J., Sun X., Camacho-Aguilera R., Kimerling L. C. and Michel J. Ge-on-Si laser operating at room temperature // *Opt. Lett.*, 2010. Vol. 35. P. 679–681.
3. Jimbo T., Egawa T., Soga T., Hayashi Y., Ishikawa H. and Umeno M. Hetero-epitaxy and material bonding for integrated multi-wavelength photonic devices // *Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation*, Tada K., Suhara T., Kikuchi K., Kokubun Y., Utaka K., Asada M., Koyama F. and Arakawa T., Eds. Tokyo, Japan: IPAP Books, 2005. P. 25–38 (ISBN4-900526-19-3).
4. Luff B.J., Feng D., Lee D. C., Qian W., Liang H. and Asghari M. Hybrid silicon photonics for low-cost high-bandwidth applications // *Adv. Opt. Technol.*, 2008. Vol. 2008. P. 1–6.
5. Kawanami H. Heteroepitaxial technologies of III–V on Si // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2001. Vol. 66. P. 479–486.

УДК 621.3.049.779

Определение потерь в планарных оптических слоях различной контрастности при производстве фотонных интегральных схем

Левин Д. Д., Светиков В. В., Стебельков А. Н.

АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

levin.denis@aonntc.ru

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; межоперационный контроль; потери в оптическом слое.

По мере увеличения требований к скорости передачи информации телекоммуникационного оборудования увеличивается спрос на разработку новых компонент на основе фотонных интегральных схем. Основным элементом таких схем является волновод, который формируют на подложке с помощью операций фотолитографии. Чем ниже контрастность волноводов, тем меньше требования к размерности волноводов, для формирования которых не требуется высокое разрешение, и тем меньше потери оптического излучения на входе/выходе из волновода и при стыковке с оптоволоконными, разница в размерах которых может варьироваться от 3 до 10 раз.

Процесс создания готовой фотонной интегральной схемы состоит из множества операций. При этом итоговые показатели по потерям оптического сигнала напрямую определяются качеством формирования волноводного слоя. Контроль потерь еще на этапе формирования оптических слоев является важной метрологической задачей, позволяя эффективно определять дефектные области в волноводном слое рабочих пластин при серийном производстве фотонных интегральных схем.

Наиболее эффективным оказалось измерение потерь с помощью призмного элемента ввода лазерного излучения в движущееся над поверхностью волноводного слоя оптоволокно [1, 2], так как это реализовано, например, в установке Metricon 2010/M. Предполагается, что в каждой точке распространяющейся полосы свет, рассеянный от поверхности и уловленный оптоволоконком, пропорционален свету, остающемуся внутри световода. Для одномодовых волноводов, работающих в С-диапазоне, характерными размерами толщин являются 3–6 мкм для волновода и 5–15 мкм для оболочки. Формируемые слои достаточно толстые, в результате это может приводить к сильному короблению исходной подложки Si, а также к тому, что в структуре волноводного слоя образуются дефекты, которые можно регистрировать на графике потерь в виде резких перепадов интенсивности, что позволяет быстро и с высокой воспроизводимостью проводить межоперационный контроль партий образцов. При этом лучевой метод расчета возбуждаемых мод [3] для низкоконтрастных волноводов ($\Delta = 0,7\%$) является некорректным для основной моды ($m = 0$) и вблизи отсечки на длине волны 1550 нм. Для таких случаев предпочтительно пользоваться непосредственно решением уравнений Максвелла, что демонстрирует достаточность уже 4 мкм толщины волноводного слоя для возбуждения основной моды для $\Delta l = 0,004$ ($\Delta = 0,3\%$).

Метод измерения является разрушающим, что позволяет производить манипуляции с рабочими пластинами в партии и достаточно точно и быстро проводить



анализ потерь оптического сигнала в волноводном слое. Это позволяет характеризовать дефектность волноводного слоя по всей поверхности пластины и на этапе роста оптических слоев контролировать однородность параметров формируемых фотонных интегральных схем от партии к партии.

Литература

1. Ulrich R., Torge R. Measurement of thin film parameters with a prism coupler // Applied Optics, 1973. Vol. 12. № 12. P. 2901–2908.
2. Tien P. K. Light waves in thin films and integrated optics // Applied optics, 1971. Vol. 10. № 11. P. 2395–2413.
3. Никонов Н. В., Шандаров С. М. Волноводная фотоника. — Санкт Петербург: ИТМО, 2008.

УДК 621.737.826

Современные подходы к созданию лазерных источников на основе полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 для кремниевых фотонных интегральных схемСлипченко С. О.¹, Малеев Н. А.¹, Блохин С. А.¹, Певчих К. Э.², Светиков В. В.², Пихтин Н. А.¹¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
serghpl@mail.ioffe.ru² АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Рассмотрены последние достижения в области создания лазерных источников на основе полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 для кремниевых фотонных интегральных схем. Рассматриваемые подходы включают использование дискретных кристаллов, гетерогенно и монолитно интегрированных A^3B^5 /КНИ-структур.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; ФИС; гетероструктуры A^3B^5 ; кремний на изоляторе; КНИ; гетерогенная интеграция.

В настоящее время фотонные интегральные схемы решают широкий спектр практических задач от обработки и передачи информации в оптоволоконных линиях связи и дата-центрах до сенсорики и радиофоники. Классические решения основаны на использовании планарных структур кремния на изоляторе (КНИ). Это в первую очередь обусловлено высоким уровнем доступных кремниевых технологий микроэлектроники, позволяющих формировать элементы с топологическими нормами в десятки нанометров на подложках диаметром сотни миллиметров. Доступные технологические процессы в кремниевой микроэлектронике могут быть основой для технологий формирования базовых элементов ФИС, таких как волноводы, делители, линии задержки, спектральные фильтры и т. д. Однако существенная проблема ФИС на основе структур КНИ связана с невозможностью создания эффективных источников лазерного излучения на основе кремния. В рамках доклада рассмотрены современные подходы по интеграции источников лазерного излучения с ФИС на основе КНИ. Будет рассмотрено три основных направления. В рамках первого подхода источниками лазерного излучения являются отдельные дискретные кристаллы, при этом решается задача эффективного и технологичного ввода излучения таких кристаллов в волноводы ФИС. В качестве базовых источников излучения могут использоваться как торцевые лазерные диоды Фабри — Перо, так и вертикально излучающие лазеры. Будет рассмотрена специфика использования данных типов лазерных источников. Второй подход основан на использовании гетерогенно интегрированных структур A^3B^5 /КНИ. Данный подход позволяет решить серьезную проблему юстировки и согласования волноводов дискретных элементов, которая характерна для первого подхода, а также существенно снизить габариты. Развитие данной технологии позволит за счет монолитной интеграции уйти от ограничений по количеству источников лазерного излучения, доступных для размещения на ФИС без заметного увеличения ее габаритов. В рамках доклада



представлены современные экспериментальные результаты, а также базовые конструкции лазерных источников, основанные на планарных и вертикальных резонаторных структурах. Третий подход основан на технологии эпитаксиального роста A^3B^5 -гетероструктур на структурах КНИ. Ключевая особенность данного подхода связана с заменой технологической операции сращивания двух отдельных гетероструктур A^3B^5 и КНИ на технологию эпитаксиального роста. Однако основная проблема связана с огромным рассогласованием постоянных кристаллической решетки материалов A^3B^5 , позволяющих получать излучение в окне прозрачности кремния, и собственно кремниевого эпитаксиального слоя. В докладе рассмотрены как базовые конструкции лазерных источников, получаемых в рамках технологии эпитаксиального роста A^3B^5 на КНИ, так и основные технологические подходы по росту сильнонапряженных структур, направленные на борьбу с дислокациями.

УДК 621.373.826

Вертикально-излучающие лазеры спектрального С-диапазона с полосой модуляции свыше 10 ГГц**Воропаев К. О.¹, Воропаева И. О.¹, Блохин С. А.², Карачинский Л. Я.³, Новиков И. И.³, Егоров А. Ю.³**¹ АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. ИИ voropaevko@okbplaneta.ru

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ ООО «Коннектор Оптикс»

194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, литер Б

В данной работе представлены результаты создания и исследования одночастотных длинноволновых вертикально-излучающих лазеров оптического С-диапазона. Приведены конструкция и достигнутые характеристики.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер; прямое межмолекулярное соединение; молекулярно-пучковая эпитаксия; прямая модуляция.

Введение

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) представляют интерес для различных систем с оптической связью. Особый интерес представляют одночастотные ВИЛ диапазона 1,55 мкм, поскольку на данной длине волны потери при распространении излучения в кварцевом волокне минимальны, что позволяет обеспечить максимальную дальность передачи оптического сигнала. Также данные лазеры представляют интерес для реализации оптической передачи данных на сверхкороткие расстояния при гибридной интеграции с кремниевыми оптическими и электронными схемами ввиду оптической прозрачности волноводов на основе кремния на данной длине волны [1].

Конструкция

Для практической реализации ВИЛ спектрального С-диапазона перспективным является использование гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) активной области на основе InAlGaAs/InP. Для решения проблемы низкой теплопроводности распределенных брэгговских отражателей на основе решеточно-согласованных с InP четвертьволновых слоев было предложено использовать конструкцию ВИЛ, совмещающую в себе активную область на основе твердых растворов, выращенных на подложке InP, и эффективные брэгговские отражатели на основе AlGaAs/GaAs, а также зарашенный туннельный переход для формирования эффективного токового и оптического ограничения [2]. Соединение активной области и брэгговских отражателей в данной конструкции осуществляется посредством прямого межмолекулярного соединения пластин. Конструкция кристалла ВИЛ, изготовленного по такой концепции, представлена на рис. 1. Стоит отметить, что в рамках данной работы ГЭС для формирования конечной структуры ВИЛ были реализованы исключительно в рамках технологии молекулярно-пучковой эпитаксии. Технологические особенности изготовления данного типа лазеров приведены в работе [3].

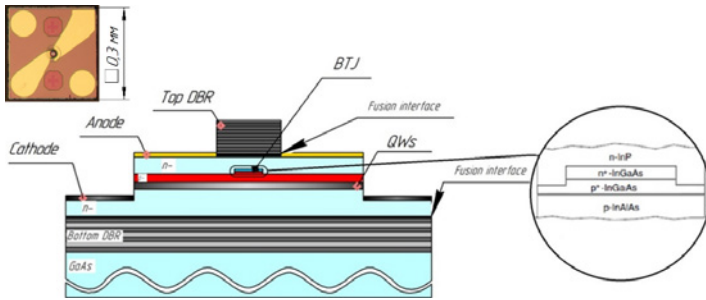


Рис. 1. Конструкция кристалла ВИЛ оптического С-диапазона в рамках технологии прямого межмолекулярного соединения пластин

Характеристики

Изготовленные ВИЛ С-диапазона при комнатной температуре демонстрируют: пороговые токи на уровне 2 мА, дифференциальную квантовую эффективность более 0,4 Вт/А, максимальную оптическую мощность в одномодовом режиме генерации 4,5 мВт при подавлении боковых мод свыше 40 дБ, эффективную частоту прямой модуляции по уровню -3 дБ 12 ГГц, скорость передачи данных 20 Гб/с, коэффициент спектральной перестройки с током 0,4 нм/мА. Максимальная температура работы созданных ВИЛ составляет 90°C , при этом выходная оптическая мощность достигает значения более 0,5 мВт.

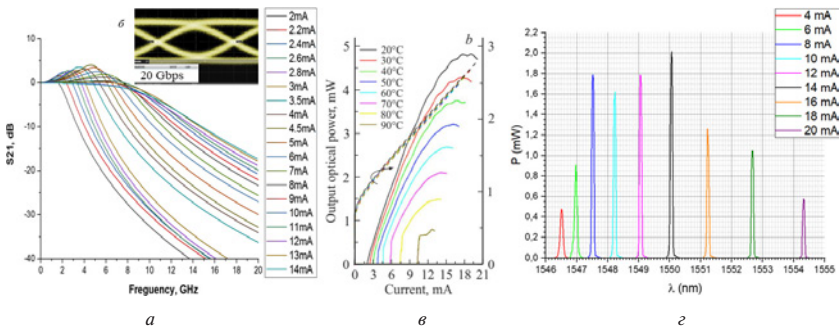


Рис. 2. Характеристики полученных ВИЛ: а) частотно модуляционная характеристика, б) глазковая диаграмма при 20 Гб/с, в) вольт-ватт-амперная характеристика, г) спектральная характеристика

Заключение

Оценка характеристик изготовленных ВИЛ С-диапазона демонстрирует возможность применения данных лазеров в цифровых и аналоговых линиях связи, также при относительно простой модернизации конструкции ГЭС существует возможность расширить рабочий диапазон длин волн до 1280–1700 нм, что дает перспективу для применения данных ВИЛ в области газоанализа.

Литература

1. Haglund P., Haglund P., Kumari Sulakshna, Haglund Erik, Gustavsson Johan S., Baets Roel G., Roelkens Gunther and Larsson Anders. Silicon-integrated short-wavelength VCSELs // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron, 2017. Vol. 23. P. 1–9.
2. Sirbu A., Iakovlev V., Mereuta A., Caliman A., Suruceanu G., Kapon E. Wafer-fused heterostructures: Application to vertical cavity surface-emitting lasers emitting in the 1310 nm band // Semiconductor Science and Technology, 2011. 26. P. 014016.
3. Voropaev K. O., Seleznev B. I., Prokhorov A. Yu., Ionov A. S., Blokhin S. A. The fabrication technology of VCSELs emitting in the 1.55 μm waveband // J. Phys.: Conf. Ser., 2020. 1658, 012069.



УДК 621.373.826

Квантово-каскадные лазеры диапазона длин волн 4–8 мкм

Соколовский Г. С.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26*

В докладе представлено состояние разработок и исследований квантово-каскадных лазеров и детекторов среднего ИК-диапазона, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране, включая демонстрацию ККЛ на длине волны 4,5 мкм с мощностью более 14 Вт и ККЛ с рекордной мощностью более 16 Вт на длине волны 8 мкм.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; квантово-каскадный детектор; средний инфракрасный диапазон.

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) с момента предложения принципа их работы Сурисом и Казариновым в 1971 году [1], и в особенности после их создания в 1994 году группой Капассо [2], привлекают пристальное внимание научного сообщества из-за перспектив многочисленных применений в газоанализе, биомедицинских исследованиях, беспроводной оптической связи и многих других областях. Основным отличием ККЛ от лазерных диодов, является их униполярность, т. е. использование для лазерной генерации переходов электронов между уровнями размерного квантования в зоне проводимости, что обеспечивает возможность достижения внутренней квантовой эффективности значительно выше 100 %.

Однако, к сожалению, высокая эффективность ККЛ трудно реализуема на практике из-за необходимости роста большого количества слоев, на два порядка большего по сравнению с лазерными диодами, и поддержания идентичности составов и толщин квантовых каскадов в течение длительного эпитаксиального процесса. Объясняемое этими трудностями отставание отечественных ученых в создании ККЛ удалось заметно сократить в течение последних нескольких лет.

Помимо обзора мирового состояния исследования и разработок мощных квантово-каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона, в докладе обсуждаются результаты исследования ККЛ, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране. Среди полученных результатов следует отметить демонстрацию выходной мощности лазерной генерации более 14 Вт на длине волны в области 4,6 мкм [3], рекордную, превышающую 16 Вт, мощность, достигнутую в ККЛ спектрального диапазона 8 мкм [4], создание квантово-каскадных детекторов на основе структуры ККЛ рекордной мощности с измеренной чувствительностью 20 мА/Вт, превосходящей аналогичные детекторы со специально оптимизированной структурой, а также неожиданные динамические характеристики квантовых каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона [5].

Литература

1. Казаринов Р. Ф., Сурис Р. А. // ФТП 5, 1971. 797.
2. Faist J. et al. // Science 264, 1994. 553.
3. Dudelev V. V. et al. // ICLO, St. Petersburg, Russia, 2022.
4. Cherotchenko E. D. et al. // Nanomaterials 12, 2022. 3971.
5. Cherotchenko E. D. et al. // Journal of Lightwave Technology, 2022. 40 (7). 2104–2110.

УДК 538.9

Поверхностные состояния на границе между двумя трехмерными топологическими изоляторами BSTS

Пугачев М. В., Шуплецов А. В., Кунцевич А. Ю.

*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН**119991, г. Москва, Ленинский просп., 53**pugachev.mv@phystech.edu*

Изготовлены структуры топологический изолятор / топологический изолятор из $\text{Bi}_1.1\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{Sb-Sn}$ (BSTS), в которых ожидалось возникновение новых свойств на интерфейсе. Изучены магнитотранспортные свойства границы между двумя трехмерными топологическими изоляторами. Анализ магнитосопротивления, эффекта Холла и слабой антилокализации при низких температурах показал устойчивость поверхностных состояний в структуре BSTS/BSTs.

Ключевые слова: топологический изолятор; поверхностные носители заряда; вандерваальсов материал; магнитотранспортные свойства.

Топологический изолятор (ТИ) — материал, который в объеме представляет собой диэлектрик, а на поверхности проводит электрический ток. В ТИ поверхностные носители заряда обладают важным свойством: векторы спина и импульса всегда перпендикулярны друг другу, что делает топологические поверхностные состояния устойчивыми к немагнитным примесям и увеличивает подвижность поверхностных носителей [1]. ТИ имеют потенциал применения в электронике с низким энергопотреблением, квантовых вычислениях и спинтронике [2, 3].

В данной работе исследуются магнитотранспортные свойства границы между двумя трехмерными топологическими изоляторами $\text{Bi}_1.1\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{Sb-Sn}$ (BSTS). BSTS является слоистым вандерваальсовым материалом, и его чешуйки могут быть получены на кремниевой подложке с помощью механического отщепления скотчем. Структура формировалась из двух чешуек BSTS и представляла из себя две области с отдельными слоями BSTS и область с их перекрытием. Для формирования структуры использовался метод сухой сборки [4]. Потенциальные контакты изготавливались к каждой из областей.

Мы исследовали квантовый транспорт в режиме слабой антилокализации и классический транспорт — магнитосопротивление и эффект Холла в широком диапазоне полей и температур (от 2,2 до 300 К). Наблюдения показали, что тензор проводимости структуры BSTS/BSTs близок к сумме тензоров проводимости отдельных слоев BSTS во всем диапазоне температур. Это свидетельствует о сохранении поверхностных состояний в области интерфейса. Эффект слабой антилокализации может быть описан формулой Хиками — Ларкина — Нагаоки с использованием подгоночного параметра — префактора, который указывает на эффективное число проводящих поверхностных каналов. В экспериментах было обнаружено, что сумма префакторов для отдельных чешуек примерно равна префактору в структуре BSTS/BSTs, что также свидетельствует об отсутствии аннигиляции поверхностных состояний.

Литература

1. Xu Y. et al. Disorder enabled band structure engineering of a topological insulator surface // *Nature Communication*, 2017. Vol. 8. P. 14081.
2. He M. et al. Topological insulator: Spintronics and quantum computations // *Frontiers of Physics*, 2019. Vol. 14. P. 43401.
3. Fan Y. et al. Spintronics Based on Topological Insulators // *SPIN*, 2016. Vol. 6. P. 1640001.
4. Martanov S. et al. Making van der Waals Heterostructures Assembly Accessible to Everyone // *Nanomaterials*, 2020. Vol. 10. P. 2305.

УДК 004.383.3

РАМ4 DSP для приемо-передатчиков с дальностью передачи до 80 км в целях использования в распределенных центрах обработки данных

Иванов Д. М.^{1,2}, Елизаров С. Г.¹¹ ООО «Мальт Систем»

119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

² Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

Рассмотрены ключевые компоненты энергоэффективной архитектуры электронного цифрового сигнального процессора (DSP) для приемника волоконно-оптической линии связи с модуляцией РАМ4. В качестве алгоритма для восстановления синхронизации используется алгоритм, основанный на градиентном спуске по относительному положению интерполяции. В качестве корректора межсимвольной интерференции используется классический адаптивный КИХ-фильтр.

Ключевые слова: DSP; РАМ4; ВОЛС.

Введение

В настоящее время активно исследуется вопрос применения технологий цифровой обработки сигналов и многоуровневой модуляции РАМ4 в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи на расстояниях менее 80 км в целях повышения скорости передачи [1, 2]. Такие системы связи необходимы для создания распределенных дата-центров, которые играют критически важную роль для технологий ИИ и больших данных, а также облачных вычислений. Поскольку оптические приемники с цифровой коррекцией используют производительные ЦАП/АЦП и сложные алгоритмы обработки, их энергопотребление выше, чем у модулей, использующих аналоговую обработку, что как создает сложности для теплового дизайна модуля, так и затрудняет плотное размещение модулей. В процессе обработки принятого сигнала DSP осуществляет выборку аналогового сигнала, его квантование, восстановление синхронизации и компенсацию межсимвольной интерференции. Предложенный алгоритм использует ряд оптимизаций, которые существенно уменьшают вычислительную сложность.

Общая архитектура эквалайзера

Основным компонентом предлагаемого DSP является эквалайзер, построенный по классической схеме Гарднера [3]. На рис. 1 представлена схема предлагаемого эквалайзера.

Эквалайзер состоит из двух стадий — интерполяции и адаптивной фильтрации. Для интерполяции используется кубический алгоритм. Для оценки момента семплирования u используется метод минимизации EVM с использованием градиентного спуска:

$$\frac{dEVM}{du} = 2 \sum_s \sum_j C_s (y_j - y_j^{est}) \frac{\partial x_{r,j-s}}{\partial u}.$$

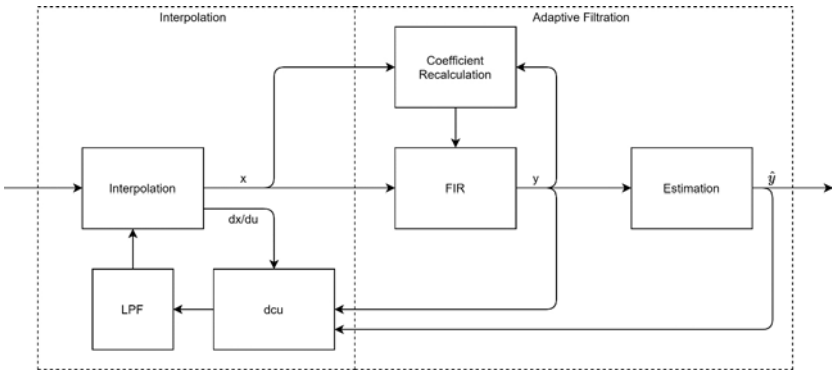


Рис. 1. Схема эквалайзера

Адаптивная фильтрация производится с помощью классического КИХ-фильтра, коэффициенты которого рассчитываются также путем минимизации EVM. КИХ-фильтр осуществляет преобразование:

$$y_i = \sum_{s=0}^{N_f-1} \sum_{b=0}^{N_{\text{spb}}-1} C_{s,b} x_{2(i-s)+b}.$$

Коэффициенты $C_{s,b}$ рассчитываются на основе значений y_n, \hat{y}_n в окне N_{CEW} :

$$\delta C_{s,b} = \sum_{n=0}^{N_{CEW}-1} \text{sgn}((y_n - \hat{y}_n^{\text{est}}) x_{n-1-N_{\text{spb}}(s-n)+b}).$$

Чтобы определить направление изменения коэффициентов, значение $\delta C_{s,b}$ сравнивается с порогом D :

$$\Delta C_{s,b} = \begin{cases} +d_C : \delta C_{s,b} > +D \\ -d_C : \delta C_{s,b} < -D \\ 0 \end{cases}$$

Использование порогового метода повышает устойчивость алгоритма, а также позволяет отказаться от дорогостоящей операции умножения. Также данный метод имеет два параметра для управления скоростью сходимости — значение порога и величина шага, что позволяет более гибко настраивать эквалайзер.

На рис. 2 представлены гистограмма восстановленного сигнала РАМ4 и график функции ошибок, который характеризует скорость сходимости.

Заключение

В работе представлена перспективная схема эквалайзера, которая позволяет эффективно производить коррекцию отстройки частот дискретизации приемника и передатчика, а также коррекцию межсимвольной интерференции при приеме сигналов с многоуровневой модуляцией РАМ4. Алгоритм работоспособен при соотношении сигнал/шум не хуже 20 дБ. Алгоритм может использоваться как в слепом режиме, так и с пилотными символами.

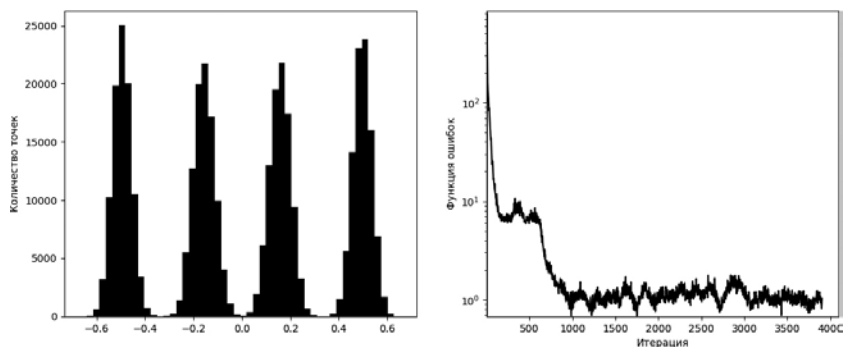


Рис. 2. Гистограмма созвездия PAM4 (а); график функции ошибок (б)

Литература

1. Citation: Zhu H. Low-Cost 400 Gbps DR4 Silicon Photonics Transmitter for Short-Reach Datacenter Application // Nanomaterials, 2021.
2. Yu R. C., Pan D. Silicon photonics applications for 5G and data centers // Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2021.
3. Zhou H., Li Y., Lu D., Yue L., Gao C., Liu Y. and Wu J. Joint clock recovery and feed-forward equalization for PAM4 transmission // Opt. Express, 2019.



УДК 621.3.049.779

Влияние неравномерности технологического процесса изготовления интегральных фотонных схем на повторяемость оптических свойств**Орликовский Н. А., Габидуллин А. Р., Габидуллина Л. А., Желтиков В. А., Шишкин А. В., Сороковых Д. Е., Денисов А. А.***Сколковский институт науки и технологий**121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
inbox@skoltech.ru*

В статье описывается разработка технологии оптоэлектронного тестирования фотонных интегральных схем на уровне пластины. Освещены проблемы такого подхода и варианты их решения. Освещены особенности обработки и интерпретации данных метрологии.

Ключевые слова: фотоника; фотонные интегральные схемы; ФИС; тестирование; технология; метрология.

Спрос и технологии интегральной фотоники развиваются стремительно, а значит, растут объемы производства таких схем. Полностью идентичные микроэлектронные способы изготовления фотонных интегральных схем все еще не являются совершенными ввиду сложности корреляций между технологией создания схемы и функциональными параметрами. Относительно микроэлектронных устройств оптическая характеристика фотонных интегральных схем оперирует другими физическими параметрами и другой аппаратной составляющей.

Основная задача при создании даже самого простого интегрального оптического элемента — правильно соотнести его геометрию с основными оптическими свойствами. К таким свойствам относятся потери, отражения и т.д. Корректное формирование такого набора информации для каждого элемента автоматически определяет требования к производству. Технологические процессы не идеальны и предполагают вариацию геометрических параметров на полупроводниковой пластине. Выстраивание связи между технологическим процессом и оптическим параметром позволит повысить процент выхода годных устройств, а следовательно, уменьшить его цену, что немаловажно при экспоненциальном росте цен в РФ на полупроводниковые материалы.

Одна из важных проблем в ходе решения такой задачи — это переход от характеристики отдельных интегральных чипов к характеристике на уровне полупроводниковой пластины. Это накладывает требования на сбор данных, обработку данных, подготовку к измерениям, инфраструктуру и даже персонал.

В рамках доклада освещаются описанные выше задачи и работы, проводимые в центре прототипирования устройств интегральной фотоники Сколтеха.

УДК 621.382.2/3

Фотонные интегральные схемы для систем квантового распределения ключей

Криштон В. Г.^{1,2,3}, Борисова А. В.², Певчих К. Э.⁴, Светиков В. В.⁴

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*

² *АО «ИнфоТеКС»
127287, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б*

Vladimir.Krishtop@infotecs.ru

³ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

⁴ *АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6*

Дан краткий обзор ситуации в России и в мире о системах для квантовой коммуникации (квантового распределения ключей — КРК) и фотонных интегральных схемах (ФИС) для этих систем. Разработан интегральный интерферометр для КРК, изготовлены прототипы и проведены первые измерения.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; фотонные интегральные схемы; квантовые коммуникации.

Мировая тенденция развития систем КРК заключается в интеграции основных элементов КРК — фотонных источников, детекторов, интерферометров, генераторов случайных чисел и элементов управления и формирования квантовых состояний — на чипах ФИС. Россия реализует государственную стратегию развития квантовых коммуникаций, строит квантовые сети на российском оборудовании КРК в масштабах страны и в области квантовых коммуникаций чувствует себя уверенно даже на фоне Китая и США. Но в вопросах интегральной оптики и производства ФИС для КРК есть существенное отставание от лидеров.

Мы совместно с ЗНТЦ — Зеленоградским нанотехнологическим центром — разрабатываем элементную базу для систем квантового распределения ключей (КРК). В докладе также обсуждается, какие интегральные оптические решения требуется разработать для квантовых коммуникаций, и приводятся примеры реализации некоторых решений за рубежом. Разработан интегральный интерферометр Маха—Цендера для применения в КРК, изготовлены первые прототипы (в ЗНТЦ) и проведены первые измерения (в «Инфотекс»). Реализована длина линии задержки 4,1 нс, измерения проводились с точностью 40 пс.

Соотношения мощностей импульсов одинаковы у обоих образцов, что говорит о хорошей повторяемости. Ожидается, что при промышленном производстве точность и воспроизводимость параметров интегральных интерферометров будут выше, чем у волоконных.

Выработка квантового ключа в лабораторном стенде системы КРК с использованием прототипов ИМЦ интегральных интерферометров проводилась в демонстрационном режиме. Предварительные результаты обнадеживают, но уровень квантовых ошибок был слишком высок. Для использования в коммерческих

изделиях необходимо, чтобы интерферометр сохранял поляризацию и имел суммарные оптические потери меньше. По итогам испытаний запланирован ряд усовершенствований для достижения целевых характеристик.

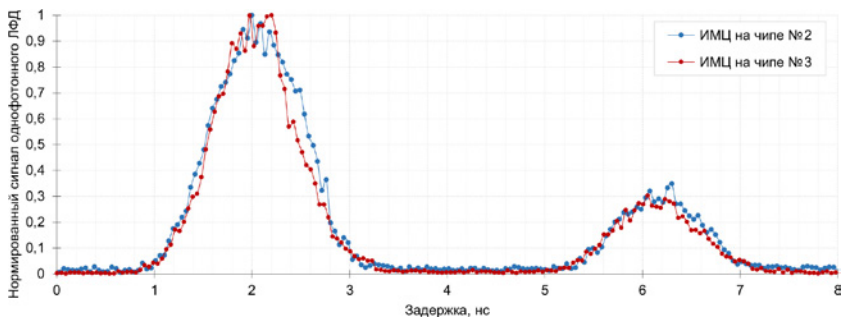


Рис. 1. Формирование двух оптических импульсов с помощью асимметричного интегрального интерферометра Маха — Цендера. На графике потери в плечах не сбалансированы, потому что измерения проведены на длине волны 1310 нм, которая используется в нашей стендовой лабораторной системе КРК

УДК 535.015

Разработка и создание отдельных элементов гибридных фотонных интегральных схем для оптических вычислений, коммуникаций и сенсоров

к. ф.-м. н. Ковалюк В. В.^{1,2}, Ан П. П.^{1,3}, Голиков А. Д.^{1,4}, Проходцов А. И.^{1,5}, Кузин А. Ю.^{1,6}, Флоря И. Н.^{1,5}, Венедиктов И. О.^{1,2}, Седых К. О.^{1,2}, Святодуч С. С.^{1,2}, Хыдырова С.^{1,7}, Кобцев Д. М.^{1,2}, Галанова В. С.^{1,2}, Кривенков Т. И.¹, Касимов Р. Х.¹, д. ф.-м. н. Гольцман Г. Н.^{1,3}

¹ Лаборатория фотонных газовых сенсоров, НИТУ «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

³ Российский квантовый центр

121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

⁴ Московский педагогический государственный университет

119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1

⁵ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

⁶ Центр фотоники и инженерии Сколковского института науки и технологий
121205 Москва, Россия

⁷ МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

В работе рассмотрены отдельные вопросы объединения фотонных интегральных схем из нитрида кремния и ниобата лития на изоляторе с графеном, нанотрубками, материалами фазовой памяти, микрофлюидными каналами, 3D оптическими межсоединениями, а также сверхпроводниковыми однофотонными детекторами.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; нитрид кремния; ниобат лития на изоляторе.

В докладе представлены результаты работы молодежной лаборатории фотонных газовых сенсоров, созданной в рамках национального проекта «Наука и университеты» (FSME-2022-0008). Работы посвящены созданию и исследованию фотонных интегральных микросхем (ФИС), включая численное моделирование, дизайн, изготовление и измерение. Первое направление деятельности лаборатории связано с применением ФИС при комнатных температурах. Для ввода-вывода света в ФИС используются дифракционные решетки с эффективностью связи 20–30% или торцевой ввод (~40%). Совместно с РКЦ ведутся исследования по созданию генератора случайных чисел на основе интерферометра Маха — Цандера с линией задержки [1], а с МФТИ — исследования по созданию 3D фотонных структур (PWB) на основе двухфотонной фотополимеризации, демонстрирующие суммарные потери около 2 дБ [2]. Совместно с МИЭТ и ИОНХ РАН проводятся исследования по объединению ФИС с материалами фазовой памяти на основе GST, используемых в мире при создании полностью оптических ФИС для нейроморфного компьютера, оптической памяти и умножения матрицы на вектор. В созданных

гибридных структурах исследован размерный эффект, влияющий на оптические свойства кольцевого резонатора, выделены области размеров, где доминируют рассеяние и поглощение, обнаружено уменьшение энергии переключения за счет легирования GST оловом [3]. Кроме того, выполнено совмещение ФИС с микрофлюидными каналами, где за счет эванесцентной связи удалось достичь высоких значений чувствительности (~ 100 нм/RIU), низкого предела обнаружения (11 ppm) вместе с малым объемом аналита (25 мкл). Продемонстрирован спекл-спектрометр, работающий в режиме микрожидкостного сенсора, а для повышения селективности микрофлюидных датчиков разработан метод модификации поверхности ФИС [4]. Исследованы (Ti/Au) микронагреватели, показывающие перестройку схем на основе Si_3N_4 с частотой 80 кГц при нескольких мВт требуемой мощности. Совместно со «Сколтехом» ведутся исследования по интеграции ФИС с графеном и нанотрубками, позволяющие увеличить нелинейность ФИС и расширить потенциал применения устройств из Si_3N_4 [5]. Начались работы по созданию устройств из тонкопленочного ниобата лития на изоляторе (LNOI), работающих в качестве высокочастотных модуляторов. На сегодняшний день достигнута амплитудная модуляция кольцевого резонатора около 7 дБ (добротность $1,8 \cdot 10^4$, быстродействие 3,6 ГГц) при требуемом напряжении $\pm 2,5$ В. Второе направление лаборатории связано с квантовыми применениями на основе ФИС, где ключевым ноу-хау является интеграция сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPDs) с волноводами из Si_3N_4 . Здесь, наряду с высоким временным разрешением (< 50 пс), низкой скоростью темновых отсчетов (< 10 Гц), удалось получить эффективность детектирования (85%) на телекоммуникационной длине волны (1,55 мкм), а также продемонстрировать квантовую передачу данных [6].

Литература

1. Shakhovoy R. et al. Phase randomness in a semiconductor laser: Issue of quantum randomness-number generation // *Physical Review A*, 2023. Vol. 107. № 1. P. 012616.
2. Zvagelsky R. D. et al. Three-dimensional polymer wire bonds on a chip: morphology and functionality // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020. Vol. 53. № 35. P. 355102.
3. Lazarenko P. et al. Low power reconfigurable multilevel nanophotonic devices based on Sn-doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ thin films // *Acta Materialia*, 2022. Vol. 234. P. 117994.
4. Kuzin A. et al. In Situ Monitoring of Layer-by-Layer Assembly Surface Modification of Nanophotonic-Microfluidic Sensor // *Analytical Chemistry*, 2022. Vol. 94. № 42. P. 14517–14521.
5. Komrakova S. et al. Hybrid Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits Covered by Single-Walled Carbon Nanotube Films // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. № 16. P. 2307.
6. Beutel F. et al. Fully integrated four-channel wavelength-division multiplexed qkd receiver // *Optica*, 2022. Vol. 9. № 10. P. 1121–1130.

УДК 681.7.068

Конструктивно-технологическое решение для создания многослойного керамического модуля с интегрированными оптическими и электрическими линиями связи**Косевской В. А., Кваша М. Ю., Плугин А. А.***АО НПЦ «СпецЭлектронСистемы»**125319, г. Москва, а/я 59, Волгоградский просп., 42, корп. 5**kosevskoy@npc-ses.ru, kvasha@npc-ses.ru, aaplugin@npc-ses.ru*

В докладе обсуждаются вопросы формирования оптических межсоединений с использованием стекловолокон, интегрированного в многослойный объемный модуль на основе керамики ЛТСС. Модуль позволяет интегрировать элементы — полупроводниковые кристаллы, а также оптические и электрические линии связи.

Ключевые слова: межсоединения; ЛТСС (низкотемпературная совместно обжигаемая керамика); многослойный керамический модуль; полупроводниковый кристалл.

Современные микропроцессорные системы создаются путем объединения большого числа быстродействующих интегральных схем, выполняющих различные функции (микропроцессоры, схемы памяти, схемы управления и коммутации, управления вводом-выводом и др.), в один модуль с помощью металлических проводников на печатной плате и соединения модулей посредством кросс-плат. Данные между модулями и полупроводниковыми кристаллами на печатных платах передаются электрическими сигналами. Быстродействие системы в целом зависит от быстродействия входящих в ее состав интегральных микросхем, а также от скорости обмена данными между ними. Наиболее важными параметрами межсоединений для перспективных ЭВМ высокой производительности являются пропускная способность и потребляемая мощность. В настоящее время введены в эксплуатацию несколько супер-ЭВМ, потребляемая мощность которых находится в диапазоне 2–30 МВт, а мощность, потребляемая межсоединениями, составляет почти 30 % полной мощности [1].

Интегральной характеристикой скорости передачи данных является пропускная способность, т. е. скорость передачи между двумя узлами ЭВМ. Для достижения высокой производительности вычислительных комплексов по сравнению с обычными медными соединениями более перспективными представляются межсоединения на основе оптических волноводов. Оценка достижимых скоростей передачи данных и обсуждение преимуществ и недостатков межсоединений на основе оптических волноводов представлены в работе [2]. Примеры использования оптических межсоединений приведены в работах [3, 4]. В патенте RU2350054 С2 [5] предлагается способ межсоединений между полупроводниковыми кристаллами при помощи волоконных оптических световодов.

В традиционной схеме построения вычислительных систем центральный процессор помещается в специальный разъем (socket), который соединяется с другими узлами компьютера с помощью большого количества электрических соединений. Основная часть этих соединений предназначена для подключения к шинам



данных, управления и адреса компьютерной системы. Как правило, процессор имеет большое количество (2000 и более) выводов, 60–70% которых используется в качестве сигнальных линий. Создание и производство коммутационных плат для обеспечения такого массива коммутационных каналов является достаточно сложной задачей.

В отличие от электрических соединений, оптика позволяет передавать большие объемы информации намного быстрее по ограниченному числу каналов (например по трем оптическим световодам), а вышеназванные потери будут отсутствовать либо сведутся к минимуму. В предлагаемой вниманию работе авторы демонстрируют возможность экспериментальной реализации конструктивно-технологического решения по созданию узла на основе многослойной керамики LTCC, в котором в единый объемный модуль интегрированы оптические и электрические каналы передачи информации. Использование в таком керамическом модуле оптических каналов связи значительно (до 45–50%) снизит количество требуемых выводов микросхемы и, соответственно, существенно увеличит пропускную способность систем ввода-вывода и передачи данных. Такое построение микропроцессорных сборок с использованием оптических каналов и применением методов мультиплексирования потоков информации при наличии быстрореагирующих микросхем со встроенными элементами приемо-передатчиков оптического сигнала позволит реализовать задачу передачи больших массивов данных с высокими быстродействием и надежностью.

Литература

1. Ахманов А. С., Соколов В. И., Панченко В. Я. Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах для микропроцессорных вычислительных систем // Успехи кибернетики, 2021. — 2 (2):21–28. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-2.
2. Белкин М., Сигов А. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия, 2012. — № 1. — С. 8–14.
3. James W. Lawson J. A. Kingston. LTCC-based System-in-a-Package Advancements and Market Potential. C-MAC MicroSystems a Solectron Company. <http://seaceramics.com/Download/Papers/LTCC-SiP-V.3%2520Final-1.pdf>.
4. Быстров Р. П., Соколов С. А., Черепенин В. А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации // Журнал радиоэлектроники, 2017. — № 6. — ISSN 1684-1719. — URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf>.
5. Никитин В. С. Патент РФ. RU2350054 С2. Микросхема с оптоволоконными многоконтактными соединениями, 2009 г.

УДК 681.782.47

Лазерное освещение**Ахмеров Ю. Л., Савчук А. А., Жаркова А. А., Чельный А. А.***АО «Оptron»**105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, корп. 7**yuri.akhmerov@yandex.ru*

Исследованы источники белого света на основе светодиодов (СИД) и лазерных диодов (ЛД). Показано, что энергетическая эффективность источников белого света на основе ЛД выше, чем на основе СИД.

Ключевые слова: светодиод; лазерный диод; люминофор; люминесценция; фотометрия.

СИД обладают недостатками, ограничивающими их оптическую мощность: из-за полного внутреннего отражения часть излучения не выходит из кристалла, при увеличении тока снижается световой поток из-за эффекта efficiency droop [1].

ЛД этих недостатков лишены: излучение выходит перпендикулярно граням резонатора; при лазерной генерации концентрация носителей в активной области не растет из-за высокой скорости рекомбинации, что значительно уменьшает утечку электронов. ЛД имеет потенциальное преимущество перед СИД по величине КПД и энергоэффективности на 20 %.

Исследованы зависимости характеристик «синего» ЛД от температуры и выходной мощности. Показано, что уширение спектра ЛД при повышении температуры не превышает величины 1 нм. Разница цветовых координат для доминирующей длины волны и длины волны в максимуме спектра ЛД составляет не более 0,01 для координат X и Y. При 1 Вт в непрерывном режиме значение цветовой температуры составило 5000 К, индекс цветопередачи — 66, световая эффективность — 185 лм/Вт.

Проведено исследование воздействия ЛД на томаты: 3 Вт для $\lambda = 660 \pm 2$ нм и 1 Вт для $\lambda = 445 \pm 5$. В результате исследований было достигнуто увеличение скорости роста растений и увеличение выхода биомассы на 10–15 %.

Литература

1. Jaehye Cho E. Fred Shubert, Jong Kyu Kim. Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures // *Laser & Photonics Reviews*, May 2013. Vol. 7. Issue 3. P. 408–421. DOI: 10.1002/lpor.201200025.



УДК 621.737.826

Полупроводниковые лазеры для дальномеров и ЛИДАРОВ автономных транспортных средств

Слипченко С. О.¹, Шушканов И. В.¹, Подоскин А. А.¹, Крючков В. А.¹,
Багаев Т. А.², Мармалюк А. А.², Ладугин М. А.², Пихтин Н. А.¹

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
serghpl@mail.ioffe.ru

²АО «НИИ «Полюс» им М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

Рассмотрены основные подходы для создания дальномеров и ЛИДАРОВ на основе полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения для различных типов транспортных средств. Представлены экспериментальные результаты по созданию источников мощных наносекундных и субнаносекундных импульсов на основе полупроводниковых лазеров.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры; импульсные лазеры; оптоволоконные модули; ЛИДАР.

Решение задачи безаварийного пилотирования транспортными средствами требует использования систем оперативного обзора окружающей обстановки, информация от которых позволяет принимать оптимальные решения по управлению транспортным средством. Лазерные ЛИДАРЫ и дальномеры являются одним из типов таких систем обзора окружающей обстановки. Основные функции данных систем сводятся к сканированию окружающего пространства в целях определения скорости и дистанции до потенциально опасных объектов. В зависимости от специфики решаемых задач требуемые дальности, скорости сканирования, углы обзора могут существенно изменяться.

В настоящее время можно выделить два подхода для решения задачи дальнометрии с использованием источников лазерного излучения: (1) основанные на принципе гетерогенного детектирования и (2) на времяпролетном принципе. Принцип гетерогенного детектирования подразумевает использование одночастотных перестраиваемых источников лазерного излучения, работающих в непрерывном режиме. Информация о расстоянии до объекта и его скорости определяется из анализа частоты биения, получаемой при смешении линий генерации опорного сигнала и сигнала от источника, в котором реализовано непрерывное перестроение линии генерации в заданном спектральном диапазоне. В докладе рассмотрены основные характеристики перестраиваемых одночастотных полупроводниковых лазеров для построения ЛИДАРных систем. В общем случае принцип времяпролетного ЛИДАРА основан на расчете времени, которое затрачивает излученный лазерный импульс на преодоление дистанции от источника до цели и обратно. В связи с этим возникает ряд требований к характеристикам подобных источников лазерного излучения: длительность импульсов, пиковая мощность, частота повторения, длина волны. Длительности импульсов определяют разрешение, и в зависимости от решаемых задач необходимые значения длительностей лежат в диапазоне от субнаносекундного до наносекундного. Пиковая мощность определяет дальность и помехоустойчивость. При этом требуемое минимальное значение составляет десятки

ватт. Частота повторения определяет возможность быстрого накопления слабого сигнала, что важно при работе со слабыми отраженными сигналами, в том числе от сильно рассеивающих поверхностей. Длина волны лазерного источника должна быть согласована с областью максимальной чувствительности фотодетекторов. В докладе рассмотрены основные экспериментальные результаты, связанные с разработкой источников мощного импульсного лазерного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур, обеспечивающих длительности импульсов в наносекундном и субнаносекундном диапазонах [1–5].

Литература

1. Подоскин А. А. и др. Лазерные диоды (850 нм) на основе асимметричной Al-GaAs/GaAs-гетероструктуры с объемной активной областью для генерации мощных субнаносекундных оптических импульсов // Квант. электрон., 2023. — Т. 53. — С. 1–5.
2. Slipchenko S. O. et al. Multiple increase in the radiative efficiency of 1060-nm laser diodes based on heterostructures with tunnel-coupled injection and a single waveguide mode // Opt. Lett., 2023. Vol. 48. P. 203–206. <https://doi.org/10.1364/OL.476248>.
3. Slipchenko S. O. et al. Tunnel-Coupled Laser Diode Microarray as a kW-Level 100-ns Pulsed Optical Power Source ($\lambda = 910$ nm) // IEEE Photonics Technol. Lett., 2022. Vol. 34. P. 35–38. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2021.3134370>.
4. Слипченко С. О. и др. Источник мощного импульсного лазерного излучения (1060 нм) с высокой частотой следования импульсов на основе гибридной сборки линейки лазерных диодов и 2D массива оптодиристоров как высокоскоростного токового ключа // Квант. электрон., 2023. — Т. 53. — С. 11–16.
5. Slipchenko S. O. et al. High-Power and Repetition Rate Nanosecond Pulse Generation in Diode Laser-Thyristor Stacks // IEEE Photonics Technol. Lett., 2021. Vol. 33. P. 11–14. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2020.3040026>.

УДК 548.55

Смешанные сегнетоэлектрические кристаллы $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$

Рощупкин Д. В., Фахртдинов Р. Р.

*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
rochtch@iptm.ru*

Методом Чохральского выращены сегнетоэлектрические кристаллы твердых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$. Выращены кристаллы конгруэнтного и стехиометрического составов. Стехиометрические кристаллы были выращены из раствора в расплаве с использованием растворителя LiWO_4 . Состав кристаллов был исследован методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Были измерены пьезоэлектрические модули и скорости поверхностных и объемных акустических волн в кристаллах.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики; метод Чохральского; объемные акустические волны; поверхностные акустические волны; пьезоэлектрические модули.

Развитие современной акустоэлектроники, акустооптики и оптоэлектроники связано с поиском новых пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических материалов с хорошими пьезоэлектрическими и акустическими свойствами [1–2]. В последнее время возник интерес к получению кристаллов твердых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$, которые комбинируют высокие значения пьезоэлектрических модулей от кристалла LiNbO_3 и хорошую термостабильность акустических свойств от кристаллов LiTaO_3 . Изменяя состав кристаллов, можно изменять скорость поверхностных и объемных акустических свойств.

В докладе рассмотрены вопросы выращивания смешанных кристаллов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$ методом Чохральского. Для выращивания кристаллов стехиометрического состава были использованы методы выращивания из раствора в расплаве с применением растворителя LiWO_4 , который позволяет увеличить концентрацию Li в расплаве. В стехиометрических кристаллах в процессе роста не формируется доменная структура, а конгруэнтные кристаллы необходимо после окончания процесса роста монодоменизировать.

На рис. 1 представлены кристаллы $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$ разного состава. Условия роста кристаллов (скорость вращения и скорость вытягивания из расплава) отличаются для кристаллов разного состава. С ростом количества Ta в кристалле необходимо увеличивать скорость вращения и уменьшать скорость вытягивания из расплава для лучшего перемешивания.

Для измерения скорости поверхностных и объемных акустических волн были изготовлены акустоэлектронные устройства, которые позволили измерить скорости. Скорости акустических волн занимают промежуточную позицию между скоростями в кристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3 . Также с использованием электроизмерительных методов были измерены пьезоэлектрические модули в выращенных кристаллах. Значения пьезомодулей также занимают промежуточное положение между значениями для кристаллов LiNbO_3 и LiTaO_3 . Таким образом, варьируя состав кристаллов, можно получить материалы с заданными значениями пьезоэлектрических модулей и скоростями акустических волн.

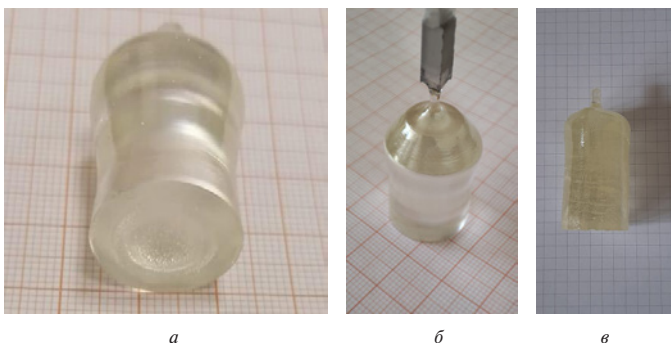


Рис. 1. Сегнетоэлектрические кристаллы твердых растворов $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$, выращенные методом Чохральского: а) $\text{LiNb}_{0,88}\text{Ta}_{0,12}\text{O}_3$, б) $\text{LiNb}_{0,95}\text{Ta}_{0,07}\text{O}_3$, в) $\text{LiNb}_{0,60}\text{Ta}_{0,40}\text{O}_3$

Литература

1. Roshchupkin D., Emelin E., Plotitsyna O. et al. Single crystals of ferroelectric lithium niobate—tantalate $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solutions for high-temperature sensor and actuator applications // Acta Cryst. B, 2020. Vol. 76. P. 1071–1076.
2. Roshchupkin D., Fakhrtidinov R., Redkin B. et al. Growth of ferroelectric lithium niobate-tantalate $\text{LiNb}_{(1-x)}\text{Ta}_x\text{O}_3$ crystals // J. Crystal Growth, 2023. Vol. 621. P. 127377.

УДК 54.057

Разработка технологии и синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия

Мочалов Л. А.^{1,2}, Кудряшов М. А.^{1,2}, Прохоров И. О.^{1,2}, Вшивцев М. А.²,
Слаповская Е. А.¹

¹ ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Mochalovleo@gmail.com

² Нижегородский государственный технический университет

им. П. Е. Алексеева

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

В настоящее время в России не производится высокочистый (7N и выше) поликристаллический GaAs для выращивания монокристаллического GaAs — базового материала СВЧ-электроники и лазерной техники. В данной работе впервые были разработаны уникальные технологии глубокой очистки исходных коммерчески доступных элементов (As и Ga) до уровня чистоты 7N и выше, а также синтеза высокочистого (7N и выше) GaAs.

Ключевые слова: арсенид галлия; технологии глубокой очистки; СВЧ-электроника; лазерная техника.

Введение

В связи с известными геополитическими событиями Российская Федерация оказалась отрезана от рынка коммерчески доступных высокочистых исходных веществ, которые широко применяются в микро- и оптоэлектронике, среди которых высокочистый поликристаллический арсенид галлия. В настоящее время в Российской Федерации не производится высокочистый (7N и выше) поликристаллический арсенид галлия (GaAs) — исходное сырье для выращивания монокристаллического GaAs. Монокристаллический GaAs, в свою очередь, является базовым материалом СВЧ-электроники и лазерной техники. Кроме того, существует четкое понимание, что в целях создания материалов для современной электронной компонентной базы в России необходимо также развивать производство высокочистых исходных элементов (чистотой 7N и выше). В настоящее время потребность в высокочистом поликристаллическом арсениде галлия оценивается от 500 кг/год.

В ходе решения поставленной научной и технологической задачи впервые были разработаны уникальные отечественные плазмохимические технологии глубокой очистки исходных коммерчески доступных элементов (As и Ga) до уровня чистоты 7N и выше из коммерчески доступного мышьяка чистотой 5N. Кроме того, впервые разработана технология загрузки исходных высокочистых элементов в реактор методом вакуумной дистилляции для обеспечения чистоты конечного продукта на уровне не хуже чистоты исходных веществ (7N и выше). Из полученного вновь разработанным способом GaAs на предприятиях ООО «Лассард» (г. Обнинск) и АО «Гиредмет» (г. Москва) выращены монокристаллы GaAs, а также измерены их свойства.

В качестве образца сравнения был выбран поликристаллический GaAs фирмы СМК, s.r.o. Slovakia, поставлявшийся на российский рынок до введения санкций.

Экспериментальная часть

Фотография установки глубокой очистки мышьяка методом сублимации с последующей парциальной конденсацией на нагретую поверхность представлена на рис. 1 (слева). Целевая фракция высокочистого мышьяка показана на рис. 1 (справа).

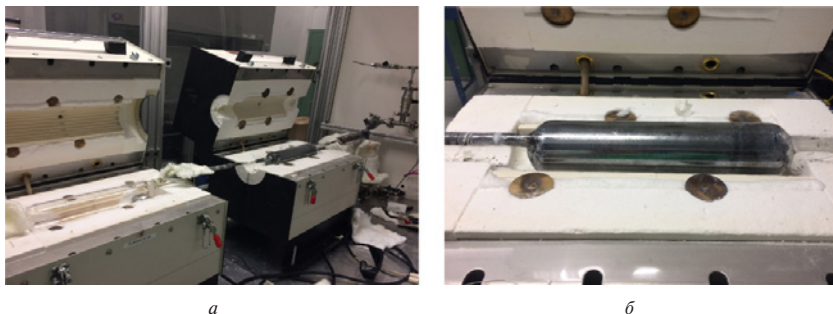


Рис. 1. Сублимация As с малой скоростью в режиме парциальной конденсации:
а)общая схема установки, б) целевая фракция высокочистого мышьяка

Содержание основных примесей в исходном As составляло: Li < 0,01, Be < 0,05, Na < 0,2, Mg < 0,05, Si < 0,1, P < 0,01, S < 0,1, K < 0,05, Ca < 0,2, V < 0,01, Cr < 0,05, Mn < 0,01, Fe < 0,1, Ni < 0,03, Co < 0,01, Cu < 0,03, Zn < 0,03, Ge < 0,03, Se < 0,1, Nb < 0,01, Cd < 0,03, Sn < 0,03, Sb < 0,01, Te < 0,02, Ba < 0,01, Hg < 0,01, Pb < 0,01, Bi < 0,01.

Содержание основных примесей в целевой фракции после очистки: Li < 0,01, Be < 0,05, Na < 0,1, Mg < 0,01, Si < 0,1, P < 0,01, S < 0,05, K < 0,05, Ca < 0,2, V < 0,01, Cr < 0,05, Mn < 0,01, Fe < 0,1, Ni < 0,03, Co < 0,01, Cu < 0,03, Zn < 0,03, Ge < 0,03, Se < 0,1, Nb < 0,01, Cd < 0,03, Sn < 0,03, Sb < 0,01, Te < 0,02, Ba < 0,01, Hg < 0,01, Pb < 0,01, Bi < 0,01.

В качестве источника галлия использовали коммерчески доступный галлий чистой 7N (99.99999) по ТУ 48-4-350.

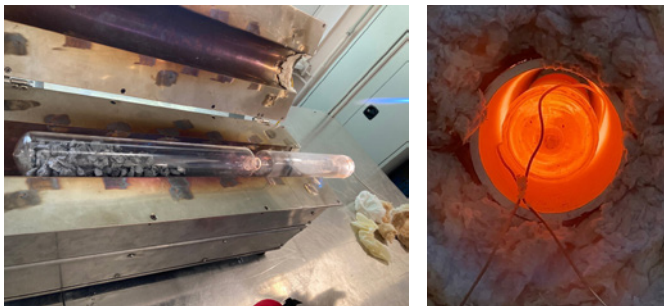


Рис. 2. Процесс синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия

Синтез высокочистого арсенида галлия осуществляли в двухзонном вакуумированном кварцевом реакторе. В результате был получен объемный образец высокочистого арсенида галлия, обладающий следующими электрофизическими параметрами: полуизолирующий, нелегированный, удельное сопротивление $R > 1 \cdot 10^7$ Ом·см, подвижность носителей заряда $> 1 \cdot 10^3$ см²В⁻¹с⁻¹, плотность ямок травления (EPD) $< 1 \cdot 10^4$ см⁻².

Заключение

Была разработана технология синтеза высокочистого поликристаллического арсенида галлия и получены образцы высокочистого поликристаллического арсенида галлия массой 2,5 кг в виде слитков диаметром от 2,5–4,25 дюйма, чистотой не менее 7N (по согласованному образцу) по своим примесным и электрофизическим параметрам (полуизолирующий, нелегированный, удельное сопротивление $R > 1 \cdot 10^7$ Ом·см, подвижность носителей заряда $> 1 \cdot 10^3$ см²В⁻¹с⁻¹, плотность ямок травления (EPD) $< 1 \cdot 10^4$ см⁻²), не уступающего лучшим зарубежным аналогам.

Литература

1. Наумов А. В. // Изв. вузов. Материалы электронной техники, 2005. — № 2. — С. 20.
2. Марков А. В. // Изв. вузов. Физика, 2003. — № 6. — С. 5.
3. Электронный ресурс: The GaAs revolution. — <http://www.compoundsemiconductor.net/article/97973-the-gaas-revolution.html>.
4. GaAs wafer market to exceed \$650 m by 2017 // Semiconductor today, 2012. Vol. 7. Iss. 3. P. 100.

УДК 621.315.592

Эпитаксиальные пленки ультраширокозонного полупроводника — оксида галлия. Высокочувствительные солнечно-слепые фотодетекторы, газовые сенсоры и диоды Шоттки

Николаев В. И.^{1,2,3}, Поляков А. Я.², Алмаев А. В.⁴¹ ООО «Совершенные кристаллы»

194223, г. Санкт-Петербург

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁴ Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Оксид галлия и его твердые растворы вызывают большой интерес из-за большого $E_g \geq 5$ эВ, доступности контролируемого легирования n -типа, достаточно высоких подвижностей и скоростей насыщения электронов, высокой фоточувствительности в дальней УФ-области спектра. Указанный набор свойств делает эпитаксиальные слои Ga_2O_3 перспективными для использования в структурах мощных и высоковольтных диодов, УФ-фотоприемников, слепых к солнечному свету, и газовых сенсорах. Отметим, что оксид галлия образует несколько полиморфных модификаций, из которых лишь β - Ga_2O_3 является термодинамически стабильным вплоть до расплавления при $T \sim 1800^\circ C$. Однако метастабильные полиморфы, как выяснилось, имеют ряд преимуществ над β - Ga_2O_3 и в последнее время стремительно выходят на передний план. Отметим, что $k(\epsilon)$ - Ga_2O_3 является единственным из полиморфов полярным кристаллом со спонтанной поляризацией, величина которой примерно на порядок выше, чем в полупроводниковых нитридах. Это позволяет рассматривать возможности так называемого поляризационного легирования, создания очень высокой плотности двумерного электронного газа (2DEG) для реаллизации в транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT). До настоящего времени потенциал $k(\epsilon)$ - Ga_2O_3 не был полностью реализован из-за невысокого кристаллического качества выращенных слоев. Отмечается склонность $k(\epsilon)$ - Ga_2O_3 к образованию 120° доменов предположительно с высокой плотностью дислокаций между ними, что сильно препятствует плоскостной проводимости в этих пленках. Существенный шаг здесь был сделан благодаря использованию технологии ELOG. Недавно эпитаксиальные пленки $k(\epsilon)$ - Ga_2O_3 с сильно подавленным образованием вращательных доменов были получены данным методом. Мы предполагаем, что возможно и некоторое естественное улучшение качества слоя с ростом его толщины по мере удаления от подложки за счет выклинивания части дефектов.

До сих пор о спектрах электронных состояний в k - Ga_2O_3 было неизвестно, мы впервые сообщаем о таких исследованиях, выполненных для диодов Шоттки с нанесенным Ni-контактом на толстые пленки k - Ga_2O_3 , выращенные методом HVPE на GaN.

В ООО «Совершенные кристаллы» разработана оригинальная технология HVPE роста эпитаксиальных слоев и приборных структур на основе α -Ga₂O₃ (3Rc) и κ -Ga₂O₃ (P₆₃mc), проводимость которых контролируется легированием слоев олова в процессе их роста. Толщина получаемых слоев может варьироваться от десятых микрона до 100 мкм и более в зависимости от поставленной задачи. Как альтернатива хлоридной эпитаксии (имеющий свои ограничения), разработан процесс получения слоев оксида галлия и родственных ему оксидов по принципу MistCVD-эпитаксии.

Перспектива развития технологии гомоэпитаксиального роста пленок на подложках объемного β -Ga₂O₃ способствовала нашей активности в получении кристаллов для изготовления подложек. Эти работы нами в настоящее время ведутся в ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Методом вытягивания из расплава по Чохральскому получены булы, которые раскалывались либо разрезались для получения подложек.

В рамках проектов РНФ в университетах МИСиС (19-19-00409) и ТГУ (20-79-10043) разработаны основы постростовых технологий для Ga₂O₃, получены макетные образцы: высокочувствительные солнечно-слепые фотодетекторы, газовые сенсоры и диоды Шоттки.

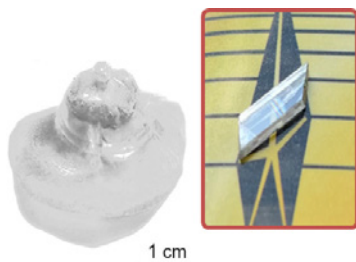


Рис. 1. Объемный кристалл β -Ga₂O₃, выращенный по способу Чохральского

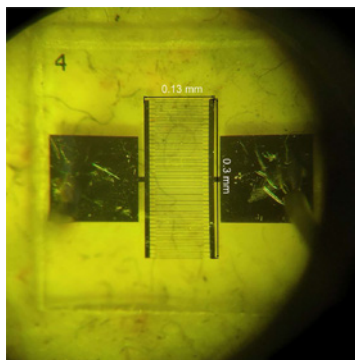


Рис. 2. Солнечно-слепой ФД на HVPE α -Ga₂O₃-пленке (максимум фотоотклика при 235 нм, EQE ~ 100000)

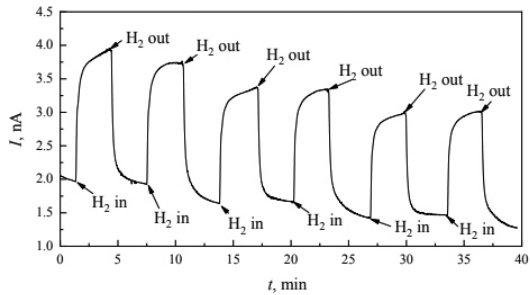


Рис. 3. Датчик водорода. Временная зависимость тока (I) в α -Ga₂O₃ с имплантацией Si⁺ $D = 8 \cdot 10^{14}$ см⁻² при напуске водорода 0,5 объем %, $T = 400^\circ\text{C}$

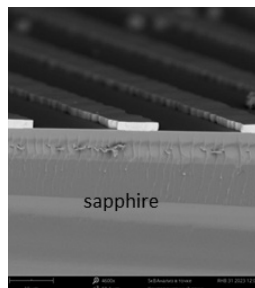


Рис. 4. ELOG («рост в окнах») HVPE k -Ga₂O₃:Sn с SiO₂-маской

УДК 544.228

Об анизотропии поверхностной энергии монокристаллов

Бокарев В. П., д. т. н., Красников Г. Я., академик РАН

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

vbokarev@niime.ru

Экспериментальные работы по определению анизотропии работы выхода электрона и адгезии сопоставлены с расчетами анизотропии поверхностной энергии по модели координационного плавления (МКП). Показано, что рассчитанная по МКП анизотропия совпадает с анизотропией работы выхода электрона и адгезии из экспериментальных работ.

Ключевые слова: анизотропия; поверхностная энергия; кристаллическая структура; работа выхода электрона; работа адгезии.

Введение

Анизотропия свойств поверхности имеет исключительное значение в технологии микро- и нанoeлектроники при расчете оптимальных рабочих характеристик разрабатываемых изделий с учетом влияния на них величин поверхностных энергий находящихся в контакте поверхностей материалов.

Модель координационного плавления кристалла (МКП), базирующаяся на примененном к поверхностному слою (толщиной в первую координационную сферу атомов) упрощенном термодинамическом расчете поверхностной энергии идеального монокристалла, находящегося в статических условиях, позволила рассчитать поверхностные энергии 97 химических элементов Периодической системы Д. И. Менделеева по известным из справочников их физическим свойствам (плотности, температуре плавления, теплоемкости и параметрам кристаллической структуры) и уточнить анизотропию удельной поверхностной энергии монокристаллов, связав ее с кристаллической структурой, работой выхода электрона и работой адгезии [1].

Сопоставление анизотропии рассчитанных по МКП значений с экспериментальными

В отличие от большинства других моделей, опирающихся на выводы Г. Вульфа о минимальном значении поверхностной энергии на гранях с максимальной ретикулярной плотностью атомов, расчеты по нашей модели показали, что максимальные значения поверхностной энергии соответствуют граням с максимальным межплоскостным расстоянием в кристаллической структуре, а значит, и с максимальной ретикулярной плотностью атомов. Но еще в 1941 г. Роман Смолуховский (R. Smoluchowski) показал, что между работой выхода электронов и ретикулярной плотностью атомов на гранях кристалла металла имеется связь: чем выше ретикулярная плотность атомов, тем выше работа выхода электронов из этой грани [2]. Выводы Смолуховского полностью подтверждают результаты наших расчетов поверхностной энергии и указывают на совпадение анизотропии поверхностной энергии с анизотропией работы выхода. В табл. 1 сопоставлены величины работ выхода электрона из разных граней монокристаллов Φ , эВ [3], с величинами удельной поверхностной энергии тех же граней σ_{hkl} , мДж/м², рассчитанными по МКП.

Таблица 1. Сопоставление величин анизотропии работы выхода Φ_{hkl} , эВ, и поверхностной энергии σ_{hkl} , мДж/м²

Me	(hkl)	Φ_{hkl}	σ_{hkl}	Me	(hkl)	Φ_{hkl}	σ_{hkl}	Me	(hkl)	Φ_{hkl}	σ_{hkl}	Me	(hkl)	Φ_{hkl}	σ_{hkl}
Li	(100)	2,40	304	V	(100)	3,95	1961	Cs	(100)	1,90	85	Cu	(100)	4,75	1686
	(110)	3,55	430		(110)	4,97	2773		(110)	2,25	120		(110)	4,45	1192
	(111)	2,30	180		(111)	4,19	1132		(111)	1,80	49		(111)	5,52	1947
K	(100)	2,214	124	Fe	(100)	4,88	1832	Nb	(100)	4,00	1871	Mo	(100)	4,35	2306
	(110)	2,75	175		(110)	5,1	2590		(110)	4,80	2646		(110)	5,05	3261
	(111)	2,35	71		(111)	4,81	1057		(111)	3,88	1080		(111)	4,10	1331
Rb	(100)	2,10	101	Ni	(100)	4,89	2405	Ta	(100)	4,17	2530	W	(100)	4,60	3020
	(110)	2,96	143		(110)	4,64	1700		(110)	4,84	3577		(110)	5,30	4270
	(111)	2,30	58		(111)	5,22	2778		(111)	4,14	1460		(111)	4,42	1743
Al	(100)	3,38	921	Pt	(100)	5,7	2280	Ir	(100)	5,37	3090	Pb	(100)	3,95	429
	(110)	4,06	651		(110)	5,4	1612		(110)	4,83	2185		(110)	3,80	304
	(111)	4,26	1063		(111)	5,9	2633		(111)	5,80	3569		(111)	4,15	496

Такая же анизотропия работы выхода была получена А. Ф. Владимировым [4] при расчете по разработанной автором квантово-механической статистической модели образования двойного электрического слоя на поверхности металла.

Из табл. 1 видно, что для кристаллов с ОЦК-структурой максимальные значения поверхностной энергии и работы выхода соответствуют граням (110), а наименьшие для данных граней значения — граням (111). Кристаллы же с ГЦК-структурой имеют, наоборот, максимальные значения этих величин на гранях (111), а минимальные — на гранях (110), что согласуется с межплоскостными расстояниями для этих граней в кристаллических структурах.

Работа адгезии на разных поверхностях монокристаллов рассмотрена на примерах ряда экспериментальных работ. Наиболее интересные результаты были получены авторами работы [5] при изучении анизотропии энергии связи атомов металлов с поверхностями монокристалла вольфрама (111) и (110).

Как видно из табл. 2, максимальное значение энергии связи для всех металлов соответствует граням (110) вольфрама. Рассчитанное нами по МКП максимальное значение поверхностной энергии W соответствует именно грани (110). Вывод о максимальном значении поверхностной энергии W_{110} соответствует уравнению Дюпре, согласно которому максимальная работа адгезии между двумя контактирующими материалами соответствует контакту с поверхностями, обладающими максимальными значениями поверхностных энергий: $W_a = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{12}$, где σ_1 и σ_2 — поверхностные энергии контактирующих веществ, а σ_{12} — поверхностная энергия границы раздела фаз.

Таблица 2. Зависимость энергии связи атомов металлов с гранями (110) и (111) вольфрама

Me	Величина энергии связи, эВ $Me-W_{hkl}$ по [5]	Max σ_{me} мДж/м ² по МКП
Ta	W_{110} 8,4 эВ max W_{111} 6,5 эВ	σ_{110} 3577
Re	W_{110} 10,5 эВ max W_{111} 7,8 эВ	σ_{0001} 4460
Os	W_{110} 8,5 эВ max W_{111} 6,8 эВ	σ_{0001} 4210
Ir	W_{110} 5,8 эВ max W_{111} 4,5 эВ	σ_{111} 3569
Pt	W_{110} 5,6 эВ max W_{111} 2,8 эВ	σ_{111} 2633

Заключение

Таким образом, модель координационного плавления кристалла выявила связь кристаллической структуры веществ с анизотропией физико-химических свойств их поверхности и указала на правильность расчетов анизотропии поверхностной энергии по МКП без привязки их к выводам Г. Вульфа [6]. Проведенные расчеты подтвердили связь максимальных величин работы выхода электрона и работы адгезии с максимальными значениями удельных поверхностных энергий этих граней кристалла и связали физико-химических свойств поверхностей кристаллов

с их кристаллической структурой и периодичностью свойств элементов по таблице Д. И. Менделеева.

Противоречие между результатами многих экспериментальных работ по изучению анизотропии свойств поверхностей монокристаллов и теоретическими расчетами по многим моделям объяснено применением при теоретических расчетах вывода Г. Вульфа о минимальном значении поверхностной энергии на гранях кристалла с максимальной ретикулярной плотностью атомов.

Литература

1. Бокарев В. П. Развитие физико-химических принципов оценки влияния поверхностной энергии на свойства материалов и процессы для технологии микроэлектроники: Диссертация д. т. н. — Москва: МИЭТ, 2020. — 292 с.
2. Smoluchowski R. Anisotropy of the Electronic Work Function of Metals // *Phys. Rev.*, 1941. Vol. 60. P. 661–674.
3. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. — Киев: Наукова думка, 1981. — 340 с.
4. Владимиров А. Ф. Анизотропия работы выхода электрона и ретикулярное уплотнение «рыхлых» граней металлических кристаллов // *Поверхность*, 1999. — № 9. — С. 58–66.
5. Plummer E. W., Rhodin H. Atomic Binding of Transition Metals on Clean Single-Crystal Tungsten Surfaces // *J. Chem. Phys.*, 1968. Vol. 49. P. 3479–3496.
6. Бокарев В. П., Красников Г. Я. Таблица Д. И. Менделеева и анизотропия физико-химических свойств поверхности кристаллов // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии в 6 томах. Том 1. Фундаментальные проблемы химической науки. — Санкт-Петербург, 2019. — С. 134.

УДК 621.315.592

Компоненты радиofотоники в ИФП СО РАН: лазеры, модуляторы, фотоприемники

Гилинский А. М., Журавлев К. С., Латышев А. В.

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13
gilinsky@isp.nsc.ru*

Представлены результаты разработки компонентов для систем радиofотоники и телекоммуникаций в ИФП СО РАН. На основе гетероструктур собственного производства разработаны VCSEL-лазеры, мощные СВЧ-фотодиоды и лавинные фотодиоды. Разработаны кремниевые модуляторы излучения, проводится разработка конструкции и технологии производства модуляторов на основе InP.

Ключевые слова: радиofотоника; СВЧ-фотодиоды; лавинные фотодиоды; электроабсорбционные модуляторы; электрооптические модуляторы; гетероструктуры; молекулярно-лучевая эпитаксия.

В работе представлены результаты разработки в ИФП СО РАН компонентов для систем радиofотоники и телекоммуникаций. Радиofотоника — новое научно-техническое направление, нацеленное на решение задач генерации, передачи и обработки аналоговых сигналов широкого спектра частот с помощью оптических технологий. К основным преимуществам систем радиofотоники относятся новые возможности обработки СВЧ-сигналов, низкие потери мощности при передаче сигналов (до 0,25 дБ/км против ≈1–5 дБ/м в «медном» кабеле в диапазоне частот 10–50 ГГц), высокая пропускная способность линий передачи (до 50 ТГц) и их высокая помехозащищенность от внешних электромагнитных воздействий, гальваническая изоляция устройств и узлов, их меньшие масса и габариты. Внедрение радиofотонных технологий является сегодня одним из важнейших направлений развития СВЧ-систем.

Базовыми компонентами для создания систем радиofотоники являются полупроводниковые лазеры, модуляторы излучения, волноводные узлы и высокоскоростные фотоприемники. В силу необходимости обеспечения широкого динамического диапазона и повышения коэффициента передачи сигнала требования, предъявляемые к таким компонентам, существенно превышают требования, предъявляемые к телекоммуникационным системам. В ИФП СО РАН проводится разработка конструкции и технологии изготовления компонентов для систем радиofотоники и телекоммуникаций, а также полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) для их производства. Для изготовления ГЭС в институте развита технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) различных систем материалов A^3B^5 и A^2B^6 , включая арсениды, фосфиды, нитриды, теллуриды, а также системы германий-кремний. Использование технологии МЛЭ обеспечивает возможность синтеза многослойных ГЭС с толщинами слоев в диапазоне от микрон до единиц атомных слоев, включая «цифровые» твердые растворы на основе сверхрешеток с параметрами, недоступными для традиционных материалов.

На основе ГЭС AlGaAs/GaAs/InGaAs в ИФП СО РАН были разработаны одномодовые VCSEL-лазеры с вертикальным резонатором для применений

в спектроскопии, стандартах частоты и коммуникациях. Для задач радиофотоники на основе ГЭС InGaAs/InAlAs/InP разработаны мощные СВЧ-чип-фотодиоды мезаконструкции с барьером Шоттки. Фотодиоды имеют полосу рабочих частот свыше 40 ГГц (фотодиоды диаметром 10 мкм) и мощность выходного СВЧ-сигнала свыше 50 мВт на частоте 20 ГГц (фотодиоды диаметром 15 мкм). Разработанные фотодиоды продемонстрировали малую величину коэффициента преобразования амплитудной модуляции интенсивности лазера в фазовую ошибку выходного СВЧ-сигнала. На основе произведенных чип-фотодиодов совместно с ООО «Ай Эм Тех» и «ТУСУР» (Томск) изготовлены мощные фотодетекторы СВЧ-диапазона частот и высокочувствительные фотодетекторы со встроенным трансимпедансным усилителем производства АО НПЦ «ЭЛВИС» (Зеленоград). Для коммуникационных применений на основе ГЭС InP/InGaAs на InP с использованием планарной технологии разработаны лавинные фотодиоды для счета одиночных фотонов.

Значительный интерес представляет разработка модуляторов излучения на основе полупроводниковых структур, выигрывающих у традиционных модуляторов на основе LiNbO₃ в компактности и интегрируемости с полупроводниковыми компонентами. В ИФП СО РАН разработаны кремниевые электрооптические модуляторы на основе *p-n*-диодов с использованием технологии локального окисления для формирования гребенчатого волновода. Разработана технология синтеза ГЭС InGaAlAs/InAlAs на InP для модуляторов, созданы ГЭС для электроабсорбционных модуляторов на длину волны 1,55 мкм с коэффициентом экстинкции более 20 дБ / 100 мкм, что сопоставимо с мировым уровнем. Проводится разработка конструкции и технологии производства электроабсорбционных и электрооптических модуляторов на основе ГЭС на InP, обеспечивающих возможность интеграции в гибридные фотонные интегральные схемы.

УДК 66.014:621.3.049.774

Результаты разработки и испытаний полирующих суспензий для процессов химико-механической планаризации в производстве интегральных схем

Максютин А. С.¹, к. х. н., Зотов Н. А.¹, Щербаков Н. А.², Ранчин С. О.³,
Дубровин А. А.³, Варламов Д. А.², Ранчина Е. Н.², Гадалин И. А.¹

¹ ООО «Научно-технический центр «Компас»»

420054, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Габдуллы Тукая, 125/4
compass.sale@gmail.com

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

niime@niime.ru

³ АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

www.mikron.ru

В статье раскрыты особенности разработки и результаты испытаний экспериментальных образцов суспензий для химико-механической планаризации (ХМП) слоев диэлектрика SiO₂ и вольфрама W. Приведены физико-химические параметры суспензий, результаты испытания и опробования, удовлетворяющие целевым требованиям процесса ХМП в производстве ИС.

Ключевые слова: химико-механическая планаризация (ХМП); суспензия; двуокись кремния; ХМП диэлектрика; ХМП вольфрама; абразив.

Введение

Одним из основных процессов производства интегральных схем (ИС) в микроэлектронике (МЭ) является процесс ХМП. Назначение ХМП — планаризация функциональных слоев ИС, сглаживание рельефа пластины и формирование гладкой поверхности перед следующими технологическими стадиями, тем самым увеличивается прецизионность производства, повышается компактность и плотность элементов ИС. Первоочередными в разработке отечественных суспензий для ХМП были выбраны суспензии для диэлектрического слоя (SiO₂) и слоя вольфрама (W), поскольку основной объем всех операций ХМП в производственном цикле ИС в мировой и отечественной практике приходится на эти операции.

Абразив

Стабильность процесса ХМП очень сильно зависит от размера, формы и распределения абразивных частиц по размерам (дисперсность) [8–12]. Если в суспензии есть частицы трех и более размеров, то такая система является полидисперсной. Предсказать поведение такого абразива в суспензии ХМП не представляется возможным. Для точного и воспроизводимого результата ХМП необходимо четко регулировать диаметр получаемых абразивных зерен. Это возможно только в *монодисперсной* системе.

Таблица 1. Значения параметров суспензии ХМП диэлектрических слоев (SiO_2)

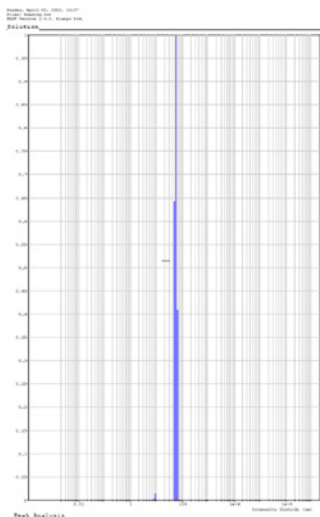
Общие данные:	
Назначение	ХМП диэлектрических слоев
Особенности	Селективная суспензия к SiO_2 ; Si_3N_4
Физические свойства	Водный раствор суспензии. Высокая коллоидная и химическая стабильность. Цвет — белый, молочный
Абразив	Коллоидная двуокись кремния (кремнезоль), монодисперсный
Регулятор pH	КОН гидроксид калия
Физико-химические свойства:	
Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Массовая доля SiO_2 , % масс., не более	35
Значение pH, 20 °С	от 9,5 до 11,5
Массовая доля элементов металлов, % масс.	10^{-3} – 10^{-5}
Средний диаметр взвешенных частиц, нм	40–150

Таблица 2. Значения параметров суспензии для ХМП слоев вольфрама W

Общие данные:	
Назначение	ХМП слоев вольфрама
Особенности	Селективная суспензия к W:TEOS
Физические свойства	Водный раствор суспензии. Высокая коллоидная и химическая стабильность. Цвет — белый, молочный.
Абразив	Коллоидная двуокись кремния (кремнезоль), монодисперсный
Физико-химические свойства:	
Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Массовая доля SiO_2 , % масс., не более	10
Значение pH, 20 °С, не более	4,5
Массовая доля элементов металлов, % масс.	10^{-3} – 10^{-5}
Средний диаметр взвешенных частиц, нм	40–200

Требуемый уровень монодисперсности в суспензиях для ХМП современного уровня производства ИС должен быть не менее 85–90%, т. е. массовая доля абразива со средним размером должна приходиться на 85–90% от всей массы абразива в суспензии.

Анализ исследования полученных образцов суспензии на распределение взвешенных частиц (абразива), Photocor mini и SEM-фото частиц демонстрируют положительный результат проделанной работы.



PSD (particle size distribution).
Slurry. Photocor mini.
02/04/2023

❖ Distribution analysis

Fitting range : [60; 160] channels
Number of Intervals : 200
Boundaries : [1.5e-4; 2.1e+9]
Resolution : 0

Peak Num	Area	Mean	Position	STD
1	0.006	8.741	8.930	1.343
2	0.994	53.07	54.85	9.996

χ^2 : 1.1e-4

Рис. 1. Анализ исследования среднего размера частиц: исследуется распределение частиц по диаметру, PSD (particle size distribution). Photocor mini. Архивные данные АО «НИИМЭ», 2023 г.

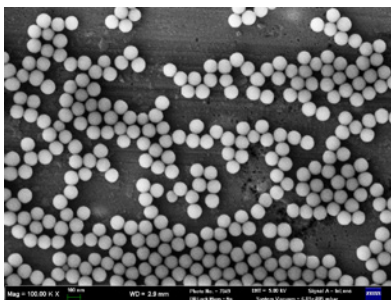
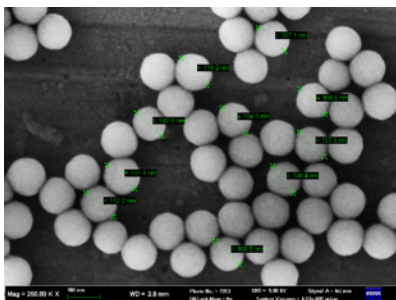


Рис. 2. SEM-фото на сканирующем электронном микроскопе. Фото 1 – с 250х, фото 2 – с 100х. Архивные данные ООО «НТЦ «Компас», 2023 г.

Из исследования видно, что полученные образцы обладают высокой монодисперсностью выше 90% (Агеа 0,994), повторяемой шарообразной формой без агломерации и средним радиусом частицы более 50 нм.

Технологическое опробование экспериментальных образцов суспензий диэлектрического слоя (SiO_2) и слоя вольфрама (W)

Опробование проводилось путем выполнения полировочных тестов образцов суспензий на полировальной установке ХМП MIRRA-MESA System 200, Applied Materials и Momentum CMP System 200, Novellus. Параметры процесса полировки и их значения были заданы согласно требованиям, установленным в технологической документации на процесс ХМП АО «Микрон».

Заключение

Разрабатываемые аналоги суспензий для ХМП диэлектрического слоя и слоя вольфрама показали сопоставимые с импортными аналогами характеристики. Результаты испытаний приняты в качестве контрольных точек в технологическом процессе изготовления суспензий для опытных партий с последующим опробованием на рабочих партиях производства ИС.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. — М., 1999. — Ч. 2.
2. Евдокимов В. Л., Ранчин С. О. Требования к чистоте технологических сред в производстве кристаллов интегральной нанoeлектроники // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016. — № 1 (161). — С. 59–71.
3. Cook Lee M. Journal of Non-Crystalline Solids. April 1990.
4. Steigerwald J. M., Murarka S. P., Gutmann R. J. Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials. USA: John Wiley & Sons Inc; 1997.
5. Kaufman F. V. et al. // Journal of the Electrochemical Society, 1991. 138 (11). P. 3460–3464.
6. Babu S. Advances in chemical mechanical planarization (CMP) // Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2017.
7. Krishnan M. et al. Chemical Reviews, 2010. 110. P. 178–204.
8. J. Electrochem. Soc., 2006. Vol. 153. Issue 6. P. K15–K22.
9. Лучинский Г. П. Курс химии. — М.: ВШ, 1985. — С. 193.
10. Айлер Р. Химия кремнезема, ч. 2. — М.: Мир, 1982.
11. Alexander G. V., McWhorter J. R., пат. США 2833742, 1958.
12. Пер R. K., пат. США 3440174, 1969.
13. Fan Wei. Advanced modeling of planarization processes for integrated circuit fabrication. Report Massachusetts Institute of Technology, 2012.
14. Sang-Shin Park a, Chul-Ho Cho b, Yoomin Ahn. Tribology International 33 (2000). P. 723–730.
15. Terrell Elon J. and C. Fred Higgs III. Hydrodynamics of Slurry Flow in Chemical Mechanical Polishing.
16. Radczewski O. E., Richter H., Kolloid-Z., 96, 1 (1941).
17. Stöber W., Tink A. // J. Colloid Interface Sci., 1968. 26, 62.
18. Lymans S., пат. США 2741600 1956.
19. Montrnyohl V. J., Olson C. V., пат. США 3346335, 1967.
20. Bobb J. S., пат. США 3650977, 1972.

УДК 621.38:539.1

Особенности радиационной компенсации широкозонных полупроводников на примере SiC

Лебедев А. А.¹, Козловский В. В.², Левинштейн М. Е.¹, Давыдовская К. С.¹,
Кузьмин Р. А.¹

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
Shura.lebe@mail.ioffe.ru

Исследована зависимость сопротивления базы SiC-диодов Шоттки от дозы облучения электронами и протонами. Показано, что наблюдающиеся зависимости можно интерпретировать на основе трехуровневой модели, учитывающей образование при облучении SiC акцепторных уровней в верхней половине запрещенной зоны.

Ключевые слова: карбид кремния; облучение; протоны; электроны; радиационные дефекты; компенсация.

Исследование свойств широкозонных материалов является одним из наиболее динамично развивающихся направлений физики полупроводников. Как правило, к широкозонным полупроводникам (ШП) относят материалы с величиной запрещенной зоны (E_g) $> 2,5-3,0$ эВ. По сравнению с классическими полупроводниковыми материалами — Si и GaAs, ШП позволяют создавать на их основе радиационно стойкие приборы, работающие при существенно более высоких температурах [1–3]. Приборы на основе ШП могут быть использованы для повышения надежности работы атомных электростанций, уже проектируемых термоядерных энергетических установок и устройств космической техники, требующих использования радиационно стойкой полупроводниковой электроники. К такой электронике предъявляются повышенные требования по сохранению исходных свойств (и/или меняющихся в допустимых пределах свойств под воздействием различных типов излучений: протонов, электронов, нейтронов, альфа- и гамма-частиц, а также тяжелых высокоэнергетических частиц.

Несмотря на многочисленные исследования, остается много неразрешенных вопросов в определении радиационной стойкости ШП и в установлении возможных путей ее повышения. В настоящей работе рассматривается один из важнейших параметров, характеризующих радиационную стойкость, — изменение концентрации носителей в зависимости от уровня компенсации образцов, обусловленной облучением электронами и протонами.

На примере карбида кремния рассмотрены особенности радиационной компенсации широкозонных полупроводников. Экспериментально прослежена зависимость сопротивления базы высоковольтных (блокирующее напряжение 600 В) SiC-диодов Шоттки от дозы облучения электронами (энергия 0,9 эВ) и протонами (энергия в МэВ) в диапазоне восьми порядков. Показано, что наблюдающиеся экспериментальные зависимости можно качественно интерпретировать на основе простой трехуровневой модели, учитывающей образование при облучении SiC акцепторных уровней в верхней половине запрещенной зоны. Продемонстрировано,

что измерение вольт-амперных ($I-V$) характеристик позволяет однозначно и надежно определять зависимости концентрации носителей (сопротивления базы) от дозы облучения в очень широком диапазоне. Показано, что определение концентрации по измерению $I-V$ -характеристик обладает несравненно более высокой разрешающей способностью, чем измерения на основе вольтфарадных ($C-V$) характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ 22-12-00003

Литература

1. Levinshtein M. E., Ivanov P. A., Boltovets M. S., Krivutsa V. A., Palmour J. W., Das M. K., Hull B. A. High-temperature (up to 773 K) operation of 6-kV 4H-SiC junction diodes // *Solid-State Electron*, 2005. 49, 1228–1232.
2. Elahipanah H., Kargarrazi S., Salemi A., Ostling M., Zetterling C.-M. 500°C High Current 4H-SiC Lateral BJTs for High-Temperature Integrated Circuits // *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2017. 38, 1429–1432.
3. Kaneko M., Nakajima M., Jin Q., Kimoto T. SiC Complementary Junction Field-Effect Transistor Logic Gate Operation at 623 K // *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2022. 43, 997–1000.

УДК 538.911: 621.793.1

III-N-гетероструктуры на подложках кремния для СВЧ-транзисторов

Цацульников А. Ф.^{1,2}, Сахаров А. В.^{1,2}, Николаев А. Е.^{1,2}, Заварин Е. Е.^{1,2},
Артеев Д. С.^{1,2}, Земляков В. Е.³, Егоркин В. И.³

¹ НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
andrew@beam.ioffe.ru

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

С использованием семейства отечественных установок МОС-гидридной эпитаксии выращены III-N-гетероструктуры с барьерными слоями AlGa_{0.2}N толщиной 3–25 нм на подложках кремния для СВЧ-транзисторов. Тестовые СВЧ-транзисторы продемонстрировали максимальный ток стока насыщения более 1400 мА/мм.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия; нитрид галлия; транзистор; НЕМТ; Si.

Установка МОС-гидридной эпитаксии для выращивания III-N-гетероструктур на подложках кремния для изготовления СВЧ-транзисторов должна обеспечивать необходимый комплекс технологических возможностей, включая условия роста слоев (In,Al,Ga)N, возможность создания изолирующего буферного слоя с помощью его легирования атомами углерода и/или железа, нанесение пассивирующего Si₃N₄-покрытия на поверхность гетероструктуры. В работе приведены результаты разработки III-N-технологии с учетом указанных выше требований на семействе установок МОС-гидридной эпитаксии, обеспечивающих рост на подложках максимального размера от 100 до 200 мм.

Представлены результаты по эпитаксиальному росту гетероструктур с барьерными слоями AlGa_{0.2}N толщиной 3–10 нм методом газофазной эпитаксии на подложках Si(111) диаметром до 76 мм. Исследованы структурные и электрофизические параметры гетероструктур в зависимости от условий выращивания и последовательности слоев. Получены транзисторные структуры с концентрацией электронов в двумерном канале более $1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Из выращенных гетероструктур были изготовлены тестовые СВЧ-транзисторы с максимальным током стока насыщения более 1400 мА/мм.

УДК 621.3.049.77:541.64

Антиотражающие покрытия для AgF- и KGF-фотолитографии

К. х. н. Курбатов В. Г.^{1,2}, д. х. н. Кузнецова Н. А.³, к. х. н. Малков Г. В.¹,
Пугачева Т. А.¹, Орган В. М.¹, Комендант Р. И.¹, Малимоненко Н. В.³,
Варламов Д. А.⁴, д. х. н. Бадамшина Э. Р.¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
kurbatovvg@list.ru

² Ярославский государственный технический университет
150023, г. Ярославль, Московский просп., 88

³ АО «НИОПИК»
123001 Москва, ул. Б. Садовая, 1, корп. 4

⁴ АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

С помощью современных физико-химических методов анализа установлены строение и состав компонентов композиции для антиотражающего покрытия, используемого в AgF- и KGF-фотолитографии. Разработана технология синтеза полимерных основ для данных антиотражающих покрытий. Получены композиции, которые опробованы в промышленном процессе.

Ключевые слова: антиотражающее покрытие; сополимер; AgF- и KGF-фотолитография; отверждение; сшивающий агент; кислотный катализатор.

Развитие микроэлектроники невозможно без постоянного совершенствования научного понимания свойств полупроводниковых материалов и приборов, а также технологических процессов, необходимых для изготовления современных изделий. Переход к новому уровню проектных норм требует освоения новых материалов и технологических процессов.

Производство интегральных схем (ИС) включает много десятков технологических операций. Одними из наиболее важных являются фотолитографический процесс формирования рельефных покрытий на функциональных поверхностях подложек для ИС. В случае экспонирования резиста монохроматическим излучением, когда топологическая норма приближается к длине волны, возникают негативные эффекты, вызванные стоячими волнами либо интерференцией в тонких пленках, что вызывает дефекты получаемого изображения. Для их подавления используются антиотражающие покрытия, в частности наносимые под пленку фоторезиста.

К антиотражающим покрытиям предъявляются достаточно высокие требования. В частности, необходимо получать покрытия с небольшой толщиной ~100 нм, при этом отверждение их должно происходить в течение 90 секунд и до глубоких содержаний сетчатого полимера, так как данное покрытие не должно после отверждения набухать в компонентах фоторезиста.

Цель настоящей работы — разработка технологии синтеза полимерной основы и состава композиции для антиотражающих покрытий, предназначенных для AgF- и KGF-фотолитографии.

С помощью комплекса аналитических методов были изучены составы промышленных аналогов композиций для антиотражающих покрытий (один образец

для AgF и два образца для KGF-фотолиграфии). Полимерной основой антиотражающего покрытия для AgF-фотолиграфии является терполимер состава (ММА 0,30–0,31 — Ст 0,30–0,31 — ГЭМА 0,39). В качестве растворителя используется метоксипропанол. В качестве сшивающего агента используется тетраметоксиметилгликолурил, а катализатором отверждения является производное п-толуолсульфоновой кислоты.

Полимерная основа в проанализированных образцах композиций для KGF-фотографии представляет собой сополимер ММА с малеиновым ангидридом (МА), этерифицированным метиловым спиртом. В качестве хромофорного соединения в данной композиции используется соединение на основе 9-антраценметанола. В качестве растворителей для этой композиции используется смесь метоксипропанола и метоксипропилацетата в различных соотношениях. Сшивающий агент представляет собой аминокформальдегидный олигомер.

Проведена экспериментальная работа по получению и характеристике методами ГПХ, ДСК, ИК- и ЯМР-спектроскопии гополимеров, двойных и тройных сополимеров на основе смесей мономеров (метилметакрилат (ММА) — стирол (СТ) — 2-гидроксиметилметакрилат (ГЭМА)) различного состава. Оработана методика расчета среднего мономерного состава синтезированных со- и терполимеров. Было установлено, что введение в состав со- и терполимера больше 38–40 мол. % ГЭМА приводит к получению плохо растворимого в метоксипропанолe вещества.

Осуществлены синтезы полимерной основы для антиотражающего покрытия, предназначенного для KGF-фотолиграфии. Причем для данных антиотражающих покрытий было рассмотрено для варианта сополимеров. Были получены сополимеры на основе ММА и МА, к которым дополнительно требовалось введение соединения, содержащего группы, обуславливающие поглощение покрытия на длине волны в 248. Второй вариант полимерной основы представлял собой (мет) акриловый сополимер, который содержал хромофорную групп в самом сополимере.

***Работа выполнена по теме № 0074-2019-0014 государственного задания
(№ гос. регистрации АААА-А19-119101590029-0) с использованием оборудования
аналитического центра коллективного пользования ИПХФ РАН***

УДК 621.3.049.77:541.64

Разработка фоторезистов для фотолитографии с актиничным излучением 193 и 248 нмД. х. н. Кузнецова Н. А.¹, к. х. н. Малков Г. В.², к. х. н. Курбатов В. Г.^{2,3}, Пугачева Т. А.², Малимоненко Н. В.¹, Варламов Д. А.⁴, д. х. н. Бадамшина Э. Р.²¹ АО «НИОПИК»

123001, г. Москва, ул. Б. Садовая, 1, корп. 4

² Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1

gmalkov@icp.ac.ru

³ Ярославский государственный технический университет

150023, г. Ярославль, Московский просп., 88

⁴ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Выполнен цикл работ по анализу литературных данных по позитивным фоторезистам для AgF- и KGF-фотолитографии, синтезу полимерных основ, разработке составов ФР и сопоставлению их свойств с аналогами. Результаты апробации показали возможность применения разработанных ФР при изготовлении ИС.

Ключевые слова: фотолитография; фоторезист; полиметакрилаты; полистиролы; сополимеры; состав.

При производстве интегральных схем (ИС) одним из наиболее важных является фотолитографический процесс формирования рельефных покрытий на функциональных поверхностях подложек с использованием фоторезистов (ФР). Фоторезист представляет собой светочувствительный технологический материал, который наносят на подложку в целях получения соответствующего фотшаблона расположения линий и окон для обработки поверхности — для доступа травящих веществ, металлизации и других операций, необходимых при изготовлении полупроводниковых приборов и устройств. Композиции ФР для фотолитографии с актиничным излучением 193 и 248 нм в настоящее время в России не производятся.

Цель настоящей работы — анализ патентной и научной литературы по составам существующих фоторезистов, использующихся в фотолитографии с актиничным излучением 193 и 248 нм, по особенностям свойств отдельных компонентов и их функциональным признакам, по методам получения и очистки полимеров, входящих в состав ФР, а также разработка и апробация подходов к синтезу полимеров, наработка партии, пригодной для составления композиции ФР, компоновка и проведение тестирования композиции на соответствующем технологическом оборудовании.

В ходе работы были определены требования к составу и свойствам композиции ФР:

- растворитель или смесь растворителей (для AgF-ФР это метоксипропилацетат и/или метоксипропанол; для KGF-ФР это этиллактат и этил-3-этоксипропионат или метоксипропилацетат);



- полимерная основа, содержащая защищенные кислотные группы, а также имеющая высокую резистентность к плазмохимическому травлению, хороший адгезионный контакт со слоем антиотражающего покрытия, хорошую смачиваемость безметалльным проявителем (для AgF-ФР это метакриловые сополимеры, содержащие объемные алициклические заместители; для KtF-ФР это сополимеры гидроксистиrolа, стиrolа и метакрилатов);
- общепринятым трендом является использование фоторезистов с химическим усилением, т. е. ФР должен содержать в своем составе фотогенераторы кислоты, образующие сильную кислоту под действием света, каждая молекула которой является катализатором каскада химических превращений, изменяющих растворимость полимерной пленки фоторезиста (сульфониевые и йодониевые соли перфторсульфокислот, имиды перфторсульфокислот);
- для улучшения сохраняемости и выравнивания края элементов фоторезиста в композиции должно присутствовать основание (quencher);
- необходимым компонентом, входящим в составы фоторезистов, является выравнивающий пленку ПАВ;
- кроме этого, композиция в целом должна характеризоваться высоким уровнем чистоты по микропримесям металлов и по содержанию взвешенных частиц, гомогенностью и термодинамической стабильностью раствора, доступностью исходных реагентов.

В ходе работы были экспериментально определены условия получения тройных сополимеров с оптимальной вязкостью, необходимой для формирования сплошных пленок определенной толщины, исследованы их свойства, наработаны и переданы образцы для составления композиции ФР. Наряду с этим была проведена разработка составов композиций фоторезистов, апробация композиций с подбором и оптимизацией режимов их нанесения, дозы и условий экспонирования. Результаты проведенного тестирования показали потенциальную возможность применения разработанных композиций при изготовлении интегральных микросхем.

***Работа выполнена по теме № 0074-2019-0014 государственного задания
(№ гос. регистрации АААА-А19-119101590029-0) с использованием оборудования
аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН***

УДК 547.279.2

Масштабируемые подходы к получению трифенилсульфониевых солей и исследование взаимосвязей их строения со свойствами в полимерной матрице

Кузнецов И. Е.¹, Кузнецова Н. А.², Сидельцев М. Е.¹, Малимоненко Н. В.², Малков Г. В.¹, Бадамшина Э. Р.¹, Аккуратов А. В.¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
akkuratow@yandex.ru

² АО «Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей»

123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, 1, корп. 4

Предложены простые и эффективные методы получения триарилсульфониевых и диарилйодониевых солей в препаративных количествах. Представлены результаты по исследованию эффекта боковых заместителей сульфониевых солей на их оптические свойства, квантовый выход фотокислоты (Φ_{H^+}) в полимерной пленке и параметр Дилла S .

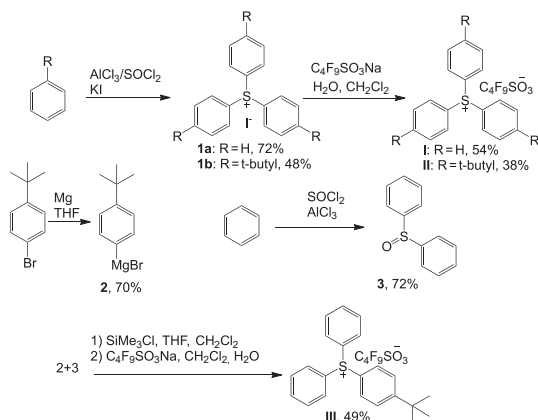
Ключевые слова: трифенилсульфониевые соли; фотогенератор кислоты; фоторезист; квантовый выход; фотолитография.

Введение

Фотогенераторы кислоты (ФГК) широко используются в композициях фоторезистов с химическим усилением, которые необходимы для изготовления современных микрочипов и микросхем с помощью методов литографии [1]. Качество изготавливаемых деталей во многом определяется чувствительностью резистов, которая, в свою очередь, напрямую связана со свойствами используемых ФГК [2]. ФГК — наиболее дорогостоящий и труднодоступный компонент фоторезистов. В связи с этим поиск простых и масштабируемых методов получения ФГК вместе с изучением взаимосвязей между их строением и свойствами являются важнейшими задачами на пути к созданию эффективных фоторезистов.

Упрощенные методы получения перспективных ФГК и исследование влияния их строения на квантовый выход фотокислоты и параметр Дилла в полимерной матрице

Для получения трифенилсульфониевых производных перфторбутансульфонозой кислоты симметричного строения **I** и **II** предложена упрощенная методика с использованием реакции ацилирования Фриделя—Крафтса и последующего анионного обмена. Отметим, что методика синтеза **I** и **II** полностью исключает использование нестабильных металлоорганических соединений и дорогостоящих сильных эфиров или ангидридов перфторалкансульфокислот по сравнению с классическими подходами [3]. Несмотря на то что соединение **III** невозможно получить без использования реагента Гриньяра **2**, промежуточный дифенилсульфоксид **3** предложено синтезировать без применения фенилмагнийбромида [3]. В соответствии с предложенными методиками наработка опытных образцов солей **I**—**III**, а также некоторых йодониевых производных в одном эксперименте достигает до 60–100 г с перспективой дальнейшего увеличения.



ФГК	E_0 , мДж/см ² (для 0% основания)	Дилл С, см ² /мДж	Φ_{H^+}
I	5,5	0,022	0,59 ± 0,03
II	3,5	0,031	0,30 ± 0,01
III	4,0	0,027	0,46 ± 0,02

Рис. 1. Схема синтеза ФГК I-III, квантовые выходы фотогенерации кислоты для соединений I-III и литографические показатели экспериментальных фоторезистов при облучении светом с $\lambda = 257$ нм

В ходе исследований свойств ФГК I-III установлено, что введение в катион трифенилсульфония *трет*-бутильных заместителей приводит к уменьшению Φ_{H^+} с 0,59 до 0,30, при этом параметр Дилла С за счет увеличения поглощения фотогенератором актиничного излучения возрастает с 0,022 до 0,031 см²/мДж. Учитывая, что практически важными характеристиками фоторезиста для фотолиитографа являются С-параметр и светочувствительность (E_0), соединение II будет наиболее перспективным ФГК в составе фоторезистов для литографии с источником света эксимерного лазера на молекулах KrF (248 нм).

Заключение

Предложенные методы получения фотогенераторов кислоты позволяют перейти от лабораторного синтеза к наработке соединений в пилотных реакторах, что делает ФГК более доступными для потребителя. Модификация периферии ароматических фрагментов фотосолей дает возможность варьировать их физико-химические свойства, а также важнейшие для литографического процесса характеристики фоторезиста — светочувствительность и параметр Дилла С.

Литература

- Oehrlein G. S., Phaneuf R. J., Graves D. B. Plasma-polymer interactions: A review of progress in understanding polymer resist mask durability during plasma etching for nanoscale fabrication // J. Vac. Sci. & Technol., 2011. Vol. 29. P. 010801.

2. Engler A., Tobin C., Lo C. K., Kohl P. A. Influence of material and process parameters in the dry development of positive-tone, polyaldehyde photoresist // J. Mater. Research, 2020. Vol. 35. P. 2917–2924.
3. Патент US 2020/0174365 A1, США. Resist Composition, Method of Forming Resist Pattern, and Compound / Ikeda T., Miyakawa J., заявитель и патентообладатель TOKYO OHKA KOGYO CO., LTD., заявл. 04.12.2018, опубл. 04.06.2020.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования
(№ 122111700041-8)*

УДК 538.9; 681.723

Диагностика, литография и метрология функциональных электронных наносистем

Щеглов Д. В., Латышев А. В.

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова

Сибирского отделения РАН

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

sheglov@isp.nsc.ru

Представлены результаты развития АСМ-технологий в области диагностики, метрологии и литографии для опережающего создания функциональных электронных наносистем с учетом их уменьшения до размеров, сравнимых с атомными, когда требуется совмещение применения методов «снизу вверх» с постоянным метрологическим контролем размеров структур, определяющих их электронные и квантовые свойства.

Ключевые слова: поверхность; нанолитография; атомно-силовая микроскопия; электронные наносистемы; нанометрология; моноатомная ступень; мера.

На современном этапе технологического развития совершенствование электронной компонентной базы столкнулось с вызовами дальнейшей миниатюризации и переходом от экстенсивного развития к интенсивному, когда значительное увеличение качественных характеристик счетной базы (уменьшение энергопотребления чипа и увеличение количества обрабатываемой им в единицу времени информации) достигается не простым увеличением элементов за счет повышения количества ярусов и плотности элементов на единицу площади плоскости чипа, а за счет новых материалов и свойств, которые проявляются именно на нанометровом диапазоне размеров и, более того, кардинально определяются этими размерами. Поиск новых решений для создания наноразмерных элементов функциональных наносистем требует одновременного введения мер для обеспечения единства измерений, при этом на существующем этапе развития технологий «сверху вниз» такие элементы не могут быть достигнуты традиционными литографическими способами, так как затрагивают размеры, сравнимые с единичными атомами.

В работе продемонстрировано применение фундаментальных процессов самоорганизации и морфологических перестроек на атомно-чистой поверхности кремния для создания мер вертикальных размеров в нанометровом и субнанометровом диапазоне, а также новых уникальных квантовых и электронных объектов, точное определения размеров которых и обеспечивается новыми мерами. Представлен комплекс взаимодополняющего оборудования, который позволяет создавать и исследовать наноразмерные структуры совмещением технологий «снизу вверх» и «сверху вниз», главной особенностью которого является возможность проведения экспериментов *in situ* — непосредственно в сверхвысоковакуумной камере специального электронного микроскопа.

В работе демонстрируются примеры созданных уникальных наноразмерных структур, обладающих рекордными характеристиками, — квантовые интерферометры, атомно-гладкие зеркала, апертуры для лазеров на основе квантовых точек. Демонстрируются особенности разработки и применения нового класса мер в субнанометровом и нанометровом диапазоне размеров, являющихся физическим носителем вторичной реализации метра.

УДК 53.088.7

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для характеристики низкоразмерных материалов. Обработка сигнала и анализ экспериментальных данных

Корепанов В. И.*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН**142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
korepanov@iptm.ru*

Перспективные материалы микроэлектроники, включая полупроводниковые и углеродные, изучаются спектроскопией комбинационного рассеяния (в англоязычной литературе Raman scattering) как быстрым и информативным методом характеристики. КР-спектры наноразмерных материалов имеют ряд особенностей, с одной стороны, затрудняющих их изучение, с другой стороны, позволяющих получать дополнительную информацию об экспериментальных данных. К этим особенностям относятся размерная зависимость, асимметричность спектральных линий и высокий люминесцентный фон.

В докладе представлены современные подходы к анализу сложных спектров и приведен ряд примеров, иллюстрирующих их применение к наноразмерным материалам.

Ключевые слова: спектроскопия; комбинационное рассеяние; наноразмерные материалы; обработка данных.

Введение

«Идеальный спектр» представляет собой несколько хорошо разделенных узких пиков на плоской базовой линии. На практике для ряда технологически и научно важных объектов спектры имеют сложный вид: высокий нелинейный фон, широкие и/или перекрывающиеся пики, шумы, низкий уровень полезного сигнала, а также приборные артефакты. С такими ситуациями сталкивается спектроскопия не только в наноразмерных полупроводниках и диэлектриках, но и в биологических объектах, полимерных и композитных материалах.

Таким образом, между физической или химической моделью образца и приборным спектром необходим «интерфейс», делающий анализ возможным. Этот интерфейс — обработка данных — в настоящее время активно развивается, и недавно появился ряд новых подходов, в разной мере математически и алгоритмически обоснованных.

Алгоритмы обработки сложных спектров

Как правило, на первом этапе обработки спектров производится отделение колебательных (фононных) линий от широкополосного фона (электронной компоненты). Наибольшую сложность вызывают широкие, а особенно перекрывающиеся пики, на которых многие из современных алгоритмов «ломаются» [1]. Хорошие результаты дает регуляризация Тихонова в асимметричном варианте с экранированием пиков [2]. Вторым этапом после отделения базовой линии является деконволюция на отдельные пики.

В альтернативном варианте обработки данных, недавно предложенном И.А. Ларкиным, первым (а также последним) шагом является модифицированная регуляризация Тихонова [3]. В этом варианте пики включаются в регуляризацию в явном виде и результатом является как базовая линия, так и параметры пиков.

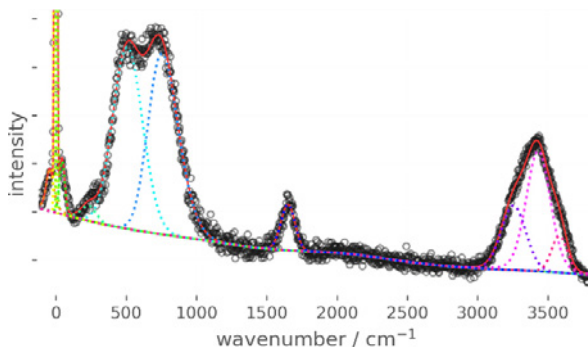


Рис. 1. Пример обработки сложного спектра модифицированной регуляризацией Тихонова [3]. Экспериментальный гипер-КР-спектр воды из работы [4]

Форма пиков для низкоразмерных объектов не всегда может быть описана симметричными функциями. Хорошие результаты дает применение асимметричного псевдофогтовского профиля [5].

Заключение

Ряд недавно предложенных алгоритмов дает возможность проводить математически обоснованную обработку экспериментальных данных. Наличие открытого кода на Python делает эти алгоритмы общедоступными инструментами.

Литература

1. Korepanov V.I. Asymmetric least-squares baseline algorithm with peak screening for automatic processing of the Raman spectra // *J. Raman Spectrosc.*, 2020. 51: 2061–2065. DOI: 10.1002/jrs.5952.
2. Korepanov V.I. Baseline Search in Raman Spectroscopy by Modified Tikhonov Regularization with Automatic Choice of Both Parameters // *The Journal of Physical Chemistry B* 127 (5), 1287–1290. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c08870>.
3. Larkin I.A. and Korepanov V. Modified Tikhonov regularization: multipeak fit algorithm. [Online]. https://github.com/the-different-name/multipeak_fit_with_baseline.
4. Korepanov V., Yu C., Hamaguchi H. // *J. Raman Spectrosc.*, 2022. DOI: 10.1002/jrs.6359.
5. Korepanov V.I. Sedlovets DM. An asymmetric fitting function for condensed-phase Raman spectroscopy. *Analyst*, 2018, 143: 2674–2679. DOI: 10.1039/c8an00710a.

УДК 535.34

Рентгеновская томография для локального контроля компонент и инспекции модулей

Чукалина М. В.^{1,2}, к. ф.-м. н., Арлазаров В. В.^{2,3}, к. т. н., Николаев Д. П.^{1,2}, к. ф.-м. н., Арлазаров В. Л.^{2,3}, д. т. н.

¹ Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН
127051, г. Москва, Большой Каретный переулок, 19, стр. 1
chukalinamarina@gmail.com

² «Смарт Энджинс Сервис»

117312, г. Москва, просп. 60-летия Октября, 9

³ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2

Сформулированы требования к томографическому ПО для рентгеновского локального контроля компонент и ПО для инспекции модулей. Представлено ПО для реконструкции, визуализации и анализа с автоматическим учетом отклонений в измерительных узлах, которое может служить платформой для целевой разработки.

Ключевые слова: программное обеспечение для томографии; томографический рентгеновский локальный контроль компонент; рентгеновская инспекция многослойных плат и модулей.

Необходимость стремительного освоения новых технологий в микроэлектронике сегодня очевидна. Технология требует последовательной отладки. Создаваемые микроэлектронные системы должны удовлетворять нормативным требованиям, формирующимся исходя из функционального назначения систем и условий их эксплуатации.

Перспективным неразрушающим методом разномасштабного контроля систем в корпусе и модулей является метод рентгеновской томографии. Высокоразрешающий томограф с оптикой в тракте позволяет при отладке технологии создания систем в корпусе исследовать поля деформаций вокруг каналов, анализировать качество пассивации поверхностей и металлизации отверстий, пространственное расположение RDL-слоев, их соответствие топологическим нормам и т. д. В дополнение он позволяет проводить неразрушающий выходной контроль готовых изделий, включая контроль качества многоуровневой сборки для разных технологий изготовления подложки при разных методах интеграции или контролировать упаковку структур на гибких носителях на этапе монтажа. Томограф с меньшим пространственным разрешением позволяет обнаруживать трещины, нарушения контактов, наплывы и т. д.

После формулировки требований к ПО и обзора современного состояния проблемы мы представим работу ПО реконструкции [1] с автоматическим учетом отклонений в узлах, визуализации и анализа. Продемонстрируем, что данное ПО может служить платформой для целевой разработки комплексов для локального контроля систем в корпусе при отладке производства или инспекции готовых изделий. Покажем, что быстрые алгоритмы реконструкции способны работать в условиях неизвестного с требуемой точностью положения оси вращения [2], неравномерного отклика ячеек детектора [3] и пр.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 23-21-00524)*

Литература

1. Shutov M. et al. Smart Tomo Engine novel tomography reconstruction tool // SFR-2022, 2022. P. 35–36.
2. Kazimirov D. et al. Mean projection image application to the automatic rotation axis alignment in cone-beam CT // 15th ICMV 2022, 2023. DOI: 10.1117/12.2680000.
3. Bukreeva I. et al. Artifacts suppression in biomedical images using a guided filter // Proc. SPIE 11605, 13th ICMV, 2021. 116050S.

УДК 538.91

Внутренние напряжения и дислокации в полупроводниковых структурах микроэлектроникиРоманов А. Е.^{1,2}¹ Университет ИТМО

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49А

alexey.romanov@niuitmo.ru

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Рассматривается напряженно-деформированное состояние полупроводниковых гетероэпитаксиальных слоев и механизмы релаксации механических напряжений в них за счет образования дислокаций несоответствия и проникающих дислокаций. Обсуждаются способы снижения плотности дислокаций в гетероструктурах.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные слои; решеточное несоответствие; механические напряжения; дислокации несоответствия; проникающие дислокации.

Решеточно-рассогласованные напряженные полупроводниковые гетероэпитаксиальные слои являются ключевыми элементами современной микроэлектроники. Во многих случаях релаксация механических напряжений в гетероструктурах приводит к формированию дислокаций несоответствия (ДН) на гетерограницах и проникающих дислокаций (ПД) в объеме слоев, а также к изменению морфологии и растрескиванию слоев.

Материалы, представленные в докладе, обобщают результаты в области теоретического анализа механических напряжений и моделирования дислокаций в полупроводниковых гетероструктурах, включая классические SiGe- и A^3B^5 -гетероструктуры [1–3], слои III-нитридных полупроводников [4–5], а также структуры на основе широкозонного полупроводника Ga_2O_3 [6].

Исследована зависимость упругих деформаций, механических напряжений и пьезоэлектрической поляризации гетерослоев $In_xGa_{1-x}N$ и $Al_yGa_{1-y}N$, полученных на подложках GaN, а также слоев различных фаз Ga_2O_3 на подложках Al_2O_3 от кристаллографической ориентации плоскости роста. Расчеты показывают, что для напряженных слоев тройных III-нитридных соединений, эпитаксиально согласованных с подложкой GaN, пьезоэлектрическая поляризация становится равной нулю для избранных неполярных ориентаций [5]. Приведены результаты аналогичного анализа для гетероэпитаксиальной орторомбической фазы $\kappa-Ga_2O_3$, сопряженной с подложкой Al_2O_3 [6]. В последнем случае предсказана кристаллография плоскостей роста, обеспечивающая минимальный уровень механических напряжений и отсутствие поляризационных эффектов в гетероструктуре.

Показано, что полосчатая морфология, наблюдаемая при росте гетероструктур, оказывается напрямую связанной с релаксацией напряжений, вызванной скольжением ПД и ДН [3]. Другой специфический механизм релаксации напряжений реализуется при прорастании наклонных ПД при увеличении толщины слоя [4]. Например, это наблюдается для полярных III-нитридных слоев с плоскостью роста (0001).

При изучении поведения ПД выявлены основные физические процессы, ответственные за снижение их плотности: (i) относительное движение ПД и (ii) реакции аннигиляции или слияния между ПД [1]. Доказано, что эффективное движение ПД может быть реализовано и в растущих релаксированных гетерослоях.

Результаты моделирования механических напряжений и дислокаций в тонкопленочных материалах электроники и оптоэлектроники сопоставлены с экспериментальными данными по релаксации напряжений в типичных системах слой — подложка для гетероструктур полупроводниковых соединений A^3B^5 и SiGe в ориентациях типа {001} и {111}, III-нитридов, выращенных как в полярной, так и полуполярной ориентациях, а также слоев Ga_2O_3 на подложках Al_2O_3 в различных фазовых модификациях.

Автор благодарит за поддержку Министерство науки и ВО РФ (проект № 2019–1442)

Литература

1. Romanov A. E., Pompe W., Beltz G. E., Speck J. S. An approach to threading dislocation “reaction kinetics” // Applied Physics Letters, 1996. Vol. 69. P. 3342–3344.
2. Romanov A. E., Pompe W., Mathis S., Beltz G. E., Speck J. S. Threading dislocation reduction in strained layers // Journal of Applied Physics, 1999. Vol. 85. P. 182–192.
3. Andrews A. M., LeSar R., Kerner M. A., Speck J. S., Romanov A. E., Kolesnikova A. L., Bobeth M., Pompe W. Modeling crosshatch surface morphology in growing mismatched layers // Journal of Applied Physics, 2004. Vol. 95. P. 6032–6047.
4. Romanov A. E., Speck J. S. Stress relaxation in mismatched layers due to threading dislocation inclination // Applied Physics Letters, 2003. Vol. 83. P. 2569–2571.
5. Romanov A. E., Baker T. J., Nakamura S., Speck J. S. Strain-induced polarization in wurtzite III-nitride semipolar layers // Journal of Applied Physics, 2006. Vol. 100. P. 023522 (1–10).
6. Smirnov A. M., Kremleva A. V., Ivanov A. Yu., Myasoedov A. V., Sokura L. A., Kirilenko D. A., Sharofidinov Sh. Sh., Romanov A. E. Stress–strain state and piezoelectric polarization in orthorhombic Ga_2O_3 thin films depending on growth orientation // Materials & Design, 2022. Vol. 226. P. 111616 (1–13).

УДК 621.3

Управление качеством базовых технологий 250, 180, 90 нм: проблемы импортозамещения материалов**Панасюк В. Н., Щербаков Н. А., Спиридонов А. В., Варламов Д. А.,****Королева А. Н. к. т. н.***АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1**akoroleva@niime.ru*

В работе рассмотрены вопросы влияния поставщиков специальных материалов на составляющие элементы базовых технологий уровня 250–90 нм в рамках действующей производственной линии. Рассмотрены дополнительные требования к поставщикам материалов, отражающих специфику микроэлектронного производства. Представлены обобщенные данные по результатам аудитов поставщиков по изготовлению материалов, показывающие системные проблемы обеспечения стабильного качества материалов.

Ключевые слова: базовая технология; специальные материалы; качество; поставщики.

В настоящее время реализация базовых технологий осуществляется в условиях затрудненного доступа к оригинальным материалам. Для выполнения задач импортозамещения АО «НИИМЭ» выполняет функции головного исполнителя различных ОКР по разработке специальных материалов с привлечением контрагентов для их изготовления, производства и поставок [2]. Наряду с задачей обеспечения стабильности функционирования производственной линии другой важнейшей задачей является обеспечение воспроизводимости электрофизических характеристик формируемой физической структуры элементной базы, максимально близкой к структуре, формируемой с использованием оригинальных материалов. Последующие возможные отклонения физической структуры несут риски неадекватности Spice-моделей и получения несоответствующих параметров микросхем после их изготовления, при этом переэкстракция параметров моделей с производственной линии требует значительных ресурсов [3]. Таким образом, во избежание рисков потери адекватности моделей и понесения значительных временных и денежных затрат как со стороны производственной линии, так и со стороны дизайн-центров необходимо выпускать материалы, характеристики которых максимально приближены к оригиналу. Для этого на этапе разработки и изготовления материалов устанавливаются дополнительные требования, связанные с конкретными методами микроэлектронного производства (рис. 1).

Наиболее критичной операцией базовых технологий является фотолитография, поэтому в приоритетном порядке рассматриваются такие материалы, как проявитель, травитель, фоторезист, АОП и др.

Как видно из рис. 1, в процессе изготовления материала на этапе ОКР новым системным требованием является проведение технологических проб на предмет изготовления микросхем. Однако их успешное завершение для определенных партий материалов в ходе ОКР не означает гарантированное качество постоянных поставок. Для обеспечения стабильности распределения параметров материалов от партии к партии требуется системная подготовка к серийным поставкам.

Введено требование к поставщикам о наличии сертификата соответствия SMK по ГОСТ Р ИСО-9001, кроме того, изготовителям материалов нужно учитывать специализированные требования базовых технологий.

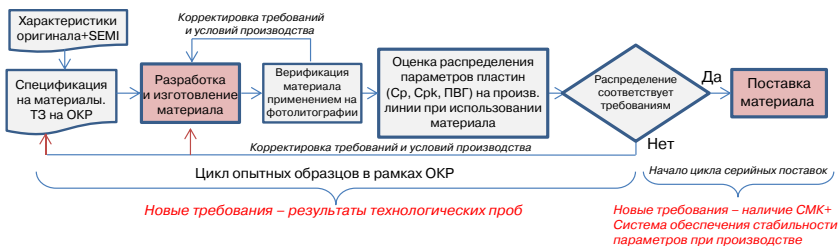


Рис. 1

Для решения этих вопросов руководством предприятия было принято совместное решение с контрагентами о проведении аудитов системы менеджмента качества предприятий — изготовителей спецматериалов в рамках подготовки к серийным поставкам. По результатам аудитов, проводимых в течение двух лет специалистами АО «НИИМЭ», выявлены следующие системные слабости поставщиков и области для улучшения при производстве специальных материалов (рис. 2).

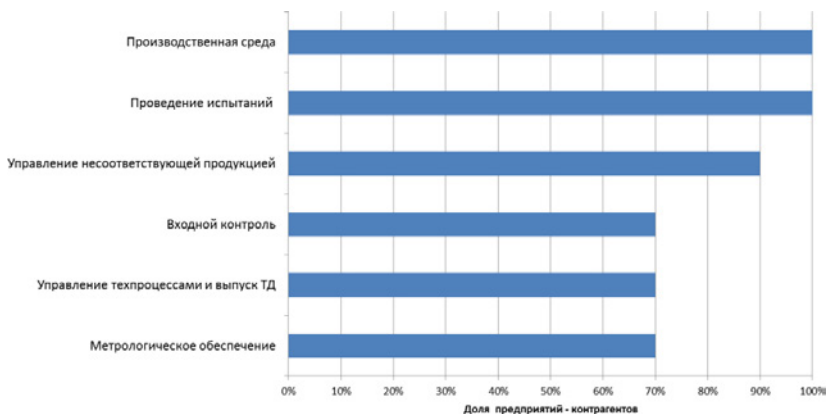


Рис. 2. Основные области для улучшения SMK предприятий — поставщиков материалов

По результатам таких аудитов поставщиками формируется план устранения несоответствий, проводится их отработка под управлением АО «НИИМЭ».

Для обеспечения объединенной (сквозной) системой контроля в процессе поставок впервые предложен трехсторонний «Сводный план контроля» по каждому материалу, содержащий требования к контрольным параметрам как на этапе изготовления, поставки материала, так и на этапах использования в технологическом процессе изготовления микросхем.

Приведенные в статье вопросы аудита СМК контрагентов являются частью системы управления базовыми технологиями, которая формируется в АО «НИИМЭ» в целях сохранения параметров базовых технологий, заданных при их квалификации, для снижения рисков дизайн-центров при проектировании и изготовлении пластин и микросхем.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Щербаков Н. А., Варламов Д. А., Сеньченко Н. С., Ранчин С. О. Отработка технологии получения безметального проявителя для микроэлектронных производств современного уровня (180–90 нм) // Российский форум «Микроэлектроника-2022». Сборник тезисов 8-й научной конференции. Фонд перспективных исследований, «Газпромбанк» (акционерное общество). — Москва, 2022. — С. 626–628.
3. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В., Шипицин Д. С., Потупчик А. Г. Отдельные аспекты анализа и оценки качества базовых технологий с проектными нормами 180 и 90 нм в условиях ограниченных ресурсов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 77–88.



УДК 621.3.049.77

Отработка технологии получения селективного травителя для микроэлектронных производств современного уровня (180 нм)

Сеньченко Н. С.¹, Варламов Д. А.¹, Щербаков Н. А.¹, Ранчин С. О.²

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В статье изложены результаты по отработке технологии получения селективного травителя, полученные на опытно-промышленной установке. Достигнуты результаты по опробованию образцов в технологическом процессе при производстве интегральных схем.

Ключевые слова: селективный травитель; буферный травитель; плавиковая кислота; фторид аммония; отработка технологии; микроэлектроника; интегральные схемы.

Введение

Совершенствование технологических процессов, использование высококачественных полупроводниковых и вспомогательных материалов для изготовления современных интегральных схем и приборов является неотъемлемой частью развития микроэлектроники. Переход к новому уровню проектных норм сопровождается освоением новых материалов и настройкой технологических процессов. С уменьшением топологических норм возрастают требования, предъявляемые к реагентам, используемым для травления. Высококачественный селективный травитель должен отвечать высоким требованиям по точности концентрации основных веществ — фторида аммония (NH_4F) $3,48 \pm 0,05\%$ масс. и плавиковой кислоты (HF) $0,64 \pm 0,02\%$ масс; по концентрации примесей элементов Al, B, Fe, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Na, Cr, Zn $< 0,1$ ppb; по концентрации анионов — хлоридов, сульфатов < 100 ppb, нитратов, фосфатов < 10 ppb, и соответствовать регламентированному содержанию частиц размером $> 0,2$ мкм. Реагенты, отвечающие предъявляемым требованиям, в России до создания и отработки технологии не производились [1, 2].

Экспериментальная часть

На установке, представленной на рис. 1, была проведена отработка процесса изготовления селективного травителя требуемой концентрации из исходных высококачественных компонентов: водного раствора фторида аммония NH_4F 40%, водного раствора плавиковой кислоты HF 49% и сверхчистой деионизованной воды (СДВ). Был осуществлен подбор оптимальных технологических параметров: объем дозируемых компонентов, проводимость, время перемешивания, необходимых для промышленного производства травителя требуемой концентрации.

Выводы

В ходе экспериментов был получен раствор селективного травителя с концентрацией основных веществ NH_4F = 3,494% масс., HF = 0,6407% масс., установлены зависимости электропроводности от температуры на этапе дозирования фторида аммония NH_4F $\sigma(T) = 1,3886T + 36,425$, а также на этапе дозирования плавиковой кислоты HF $\sigma(T) = 1,3993T + 40,815$, соответствующие требуемой концентрации

(рис. 2). Был выполнен подбор оптимального времени перемешивания исходных компонентов в системе, в ходе которого была установлена продолжительность циркуляции, составляющая не менее 2 часов с момента дозирования последнего компонента. Были установлены корректирующие добавки для регулирования концентрации состава при несоответствии значений электропроводности во время приготовления раствора.

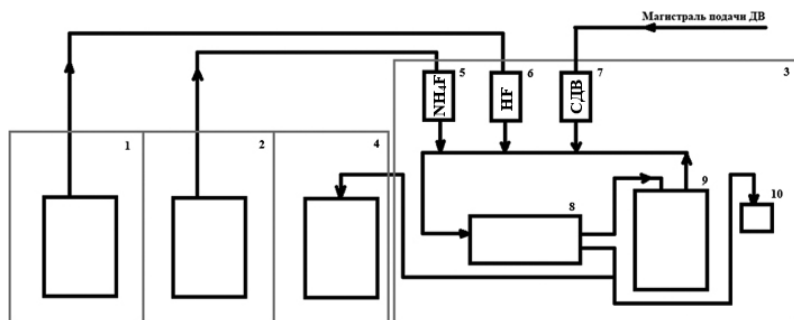


Рис. 1. Схема установки для получения травителя: 1, 2 — модули для тары с исходным сырьем: HF и NH_4F соответственно; 3 — модуль для приготовления травителя с накопительным баком; 4 — модуль для тары с готовым продуктом; 5 — блок дозирования NH_4F ; 6 — блок дозирования HF; 7 — блок дозирования СДВ; 8 — блок циркуляции, контроля, фильтрации и выдачи готового продукта; 9 — накопительный бак; 10 — бокс пробоотборника

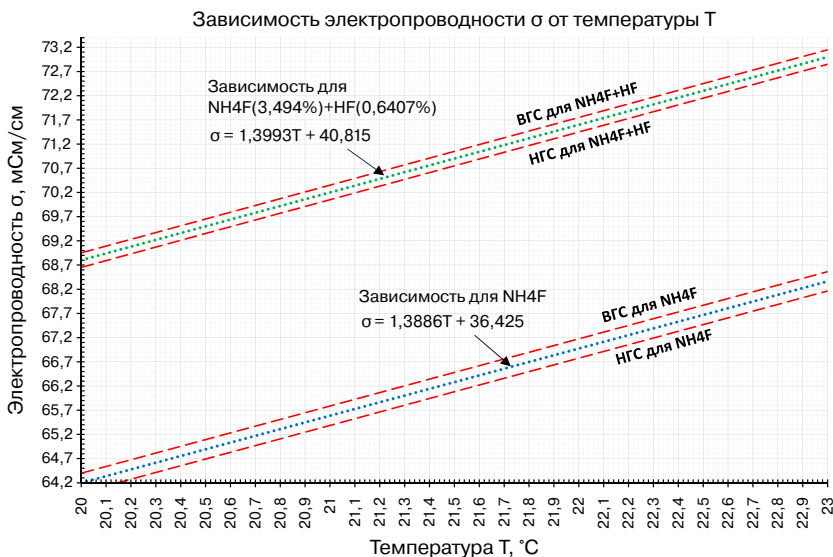


Рис. 2. Зависимость электропроводности от температуры для селективного травителя

Проведенные измерения концентрации взвешенных частиц в приготовленных растворах травителя показали результаты, отвечающие предъявляемым требованиям с большим запасом.

Полученные в ходе работы образцы селективного травителя были опробованы в технологическом процессе при производстве ИС. По результатам апробации было выдано заключение о применимости данного химического реактива в современном микроэлектронном производстве.

1. Разработанный травитель удовлетворяет границам спецификации по дефектности при применении его на рабочих пластинах. Полученные результаты сходятся с результатами при использовании импортного аналога.

2. Испытания в технологическом процессе разработанного травителя в сравнении с импортным аналогом показали минимальные отличия. Полученный материал удовлетворяет предъявляемым требованиям при изготовлении микросхем по технологии 180 нм.

Литература

1. Сеньченко Н. С. Разработка технологии получения селективного травителя и безметального проявителя для микроэлектронного производства современного уровня: магистерская диссертация, 11.04.04 [на правах рукописи]. — М.: МИЭТ, 2021. — 99 с.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.

УДК 62-416

Современные методы полирования пластин из монокристаллического алмаза для изделий микроэлектроники

Кан В. Е.^{1,2}, Теплова Т. Б.¹, Худoley А. Л.³, Артёмов Е. А.⁴, Мантузов А. В.⁴, Зарезов М. А.⁴

¹ ООО «ФРЕЗАРТ СВД»

117587, г. Москва, ул. Днепропетровская, 2, оф. 514

v.kan@frezart.ru

² ОНЦ СО РАН

644024, г. Омск, пр. К. Маркса, 15

³ Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

⁴ ООО «АЕМ Технолоджис»

109651, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Марьино,

ул. Перерва, 16, пом. 16п

Изучены возможности получения высококачественных пластин из монокристаллического алмаза различными методами: обработкой связанным абразивом, химико-механической и магнитореологической полировкой, с обеспечением шероховатости поверхности $R_q = 2-4 \text{ \AA}$.

Ключевые слова: монокристаллический алмаз; микроэлектроника; магнитореологическая полировка; химико-механическая полировка; полировка связанным абразивом; шероховатость.

Монокристаллический алмаз обладает уникальной совокупностью электрофизических свойств, поэтому он является одним из наиболее перспективных материалов для применения во многих отраслях техники. В работе [1] продемонстрирована возможность изготовления пассивных электронных компонентов на поверхности алмазных пластин, однако установлено, что характеристики элементов сильно зависят от качества полировки поверхности. Таким образом, для изготовления и производства изделий из этого вида материалов в высокотехнологичных областях необходима разработка технологии обработки их поверхности с получением нанометрового рельефа с минимальным внесением дефектов в подповерхностный слой. Авторы приводят результаты, полученные при обработке поверхности монокристаллических пластин алмаза различными методами: механическим (связанный абразив), химико-механическим и магнитореологическим.

В настоящее время в промышленности наиболее распространена технология обработки изделий из алмаза связанным абразивом на чугунном носителе, которая также традиционно применяется при огранке декоративных вставок. Авторами предложена оригинальная методика обработки алмаза. Методом АСМ установлено, что примененная обработка поверхности позволяет достичь среднеквадратичной шероховатости поверхности 2,3 нм на площади $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ [1]. В результате проведенной работы по синтезу и обработке монокристаллических заготовок были получены алмазные подложки с размерами от 5×5 до 8×8 мм и толщиной от 0,5 до 0,8 мм.

Магнитореологическое полирование (МРП) — это метод ультрапрецизионной обработки поверхности несвязанным абразивом с формированием адаптивного полировальника из магнитных микрочастиц, управляемых магнитным полем. МРП успешно применяется для получения сверхгладких поверхностей с ангстремным уровнем шероховатости [2], планаризации подложек и обработки тонких пленок микроэлектроники [3], его также эффективно используют для удаления дефектных слоев и очистки поверхности. В настоящее время ведутся работы по адаптации возможностей МРП применительно к полированию поверхностей затравок для роста монокристаллического алмаза, а также в целях снижения уровня шероховатости поверхности подложек из монокристаллического алмаза для изготовления пассивных элементов и ЭКБ силовой микроэлектроники.

В работе приведены результаты применения технологии химико-механического полирования (ХМП) поверхности монокристаллического алмаза композициями аморфного нанодисперсного кремнезема SiO_2 . На разноориентированных образцах в разных участках получена одинаково зеркально гладкая поверхность без микро- и нанопорпин от предыдущих этапов обработки и др. дефектов. Шероховатость поверхности, измеренная методом АСМ, составляет $\text{rms} = 2\text{--}4 \text{ \AA}$ (рис. 1).

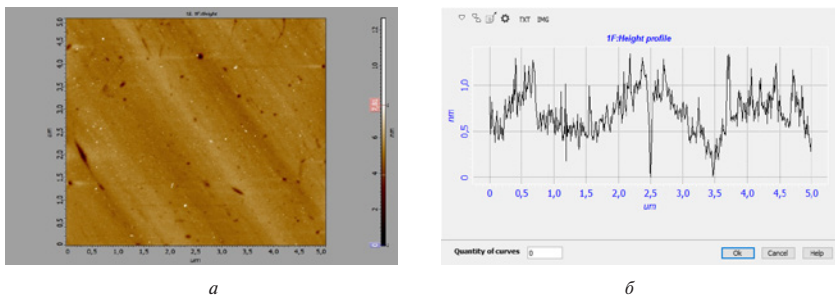


Рис. 1. 2D-изображение в АСМ (а) и сечение рельефа поверхности (б) монокристаллического алмаза после ХМП. Размер скана $5 \times 5 \text{ мкм}$, $R_q = 2,93 \text{ \AA}$

Литература

1. Кан В. Е., Колесанов А. Ф. Синтез и обработка монокристаллического алмаза для изделий микроэлектроники // Тезисы докладов научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули». Российский форум «Микроэлектроника-2022». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. — С. 606—607.
2. Yudin N., Khudoley A., Zinoviev M., Podzvalov S., Slyunko E., Zhuravleva E., Kulesh M., Gorodkin G., Kumeysya P., Antipov O. The Influence of Angstrom-Scale Roughness on the Laser-Induced Damage Threshold of Single-Crystal ZnGeP2 // Crystals, 2022. 12 (1). 83.
3. Худoley А. Л., Колпашиков В. Л., Городкин Г. Р. Получение сверхгладких поверхностей, планаризация подложек и обработка тонких пленок микроэлектроники методом магнитореологического полирования // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение: труды II Российско-белорусской научно-технической конференции имени О. В. Лосева, 17–19 ноября 2015 г., г. Нижний Новгород. — С. 283—286.

УДК 54.052

Удалители полимерной высадки после процессов сухого травления на этапе формирования металлизации при производстве ИС с субмикронными проектными нормами**Кирюшина И. В., к. т. н.***АО «НИИМЭ»**124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ikiryushina@niime.ru*

В данной работе исследовано влияние различных удалителей полимерной высадки на структуры многоуровневой Al-металлизации при производстве ИС. Было обнаружено, что боковые стенки Al-шин наиболее склонны к образованию коррозии после обработки почти во всех удалителях по сравнению с контактными площадками.

Ключевые слова: удалители; полимерная высадка; сухое травление; полимерные остатки; металлизация.

Введение

Формирование топологии современных приборов происходит с помощью процессов плазмохимического травления (ПХТ) [1]. Одной из наиболее критичных проблем является удаление полимерной высадки при формировании Al многоуровневой металлизации после ПХТ шин, контактных окон и контактных площадок, где полимер является наиболее трудноудаляемым. Целью настоящей работы было исследование качества удаления полимерной высадки в различных удалителях при формировании многоуровневой Al-металлизации.

Эксперименты и методы

Эксперименты проводились на пластинах диаметром 200 мм со сформированными Al-шинами, контактными окнами и контактными площадками. Полимерная высадка на всех формируемых элементах контролировалась методом электронной микроскопии. Для дополнительного контроля в контактных окнах и на Al-шинах использовался метод измерения линейных размеров. В качестве удалителей полимерной высадки исследовались: PRX-505 (Rohm and Haas Electronic Materials), TechniClean CA25 и TechStrip P1331 производства Technic, IDC 960 (Anji Microelectronics), Chrome-Phos (порошок оксида хрома (VI) 99% с фосфорной кислотой 86%).

Результаты

На рис. 1 показана полимерная высадка, которая образуется на контактных площадках после ПХТ-пассивации и полностью не удаляется при обработке в PRX-505. Эксперименты показали, что один и тот же удалитель не может с одинаковой эффективностью удалять полимеры на контактных площадках и в контактных окнах, а также Al-шинах (табл. 1).

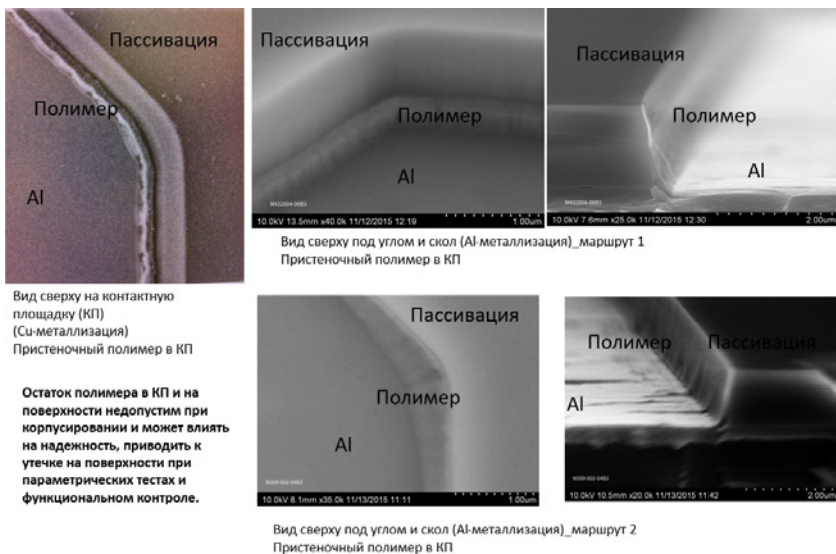


Рис. 1. Полимерная высадка на контактных площадках после ПХТ-пассивации и обработки в PRX-505 [2]

Таблица 1. Основные результаты удаления полимерной высадки в различных удалителях

#	PRX-505	CA25	P1331	IDC960	H ₃ PO ₄ -CrO ₃
Контактные площадки					
Удаление полимеров	Частичное, 3 × 3 с, RT	Частичное, 20 мин, 50 °С	Частичное, 10 мин, 50 °С	Полное, 3 × 60 с, 45 °С	Полное, 180 с, 65 °С
Коррозия Al	Отсутствует	Присутствует	Отсутствует	Отсутствует при промывке ДВ-СО ₂	Отсутствует
Подтрав интерметаллических слоев	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

#	PRX-505	CA25	P1331	IDC960	H ₃ PO ₄ -CrO ₃
Al-шины и контактные окна					
Удаление полимеров	Полное, 2 × 3 с, RT	Частичное при 5 мин, 45 °С. Полное, 20 мин, 45 °С	Полное, 10 мин, 50 °С	Полное, 3 × 45 с, 45 °С	Полное при 180 с, 65 °С, частичное при 135 с, 65 °С
Коррозия Al	Отсутствует	Присутствует при 20 мин, 45 °С	Отсутствует	Отсутствует при промывке ДВ-CO ₂	Присутствует при 180 с, 65 °С
Подтрав интерметаллических слоев	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Заключение

Поскольку полимерная высадка на контактных площадках является наиболее трудноудаляемой, а при удалении полимеров с Al-шин и в контактных окнах велика вероятность появления коррозии, целесообразно использовать для этих целей различные удалители, а не один и тот же удалитель, что наиболее часто встречается в существующих технологических маршрутах.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Кирушина И. В. Особенности процессов жидкостной химической обработки кремниевых пластин в технологиях с проектными нормами 180 нм и ниже // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — С. 499–504.

УДК 538.911:538.955:538.958

Многослойный твист-графен для фотодетектирования

Кононенко О. В., Зотов А. В., Князев М. А., Волков В. Т., Матвеев В. Н.

*Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
oleg@iptm.ru*

Пленки многослойного твист-графена были получены на пленках железа методом CVD при низком давлении с однократным напуском ацетилена. Фото-термоэлектрический эффект был исследован в двухтерминальных структурах металл / многослойный твист графен / металл.

Ключевые слова: многослойный твист-графен; CVD; фототермоэлектрический эффект.

Введение

Графеновые фотодетекторы в настоящее время являются одним из наиболее активно изучаемых фотонных устройств. В отличие от полупроводниковых фотоприемников, которые имеют ограниченную спектральную ширину детектирования, графен в принципе может использоваться в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного и терагерцевого. Достоинством графена является высокая подвижность электронов и дырок, что может обеспечить времена срабатывания детекторов вплоть до десятков пикосекунд [1].

Из-за отсутствия запрещенной зоны графеновый фотодетектор требует иной модели извлечения носителей, чем полупроводниковые фотодетекторы. Фототермоэлектрический эффект — один из наиболее эффективных механизмов преобразования фотонов в электрический ток.

Многослойный твист-графен (МТГ) является относительно новым материалом, и его оптоэлектронные свойства до сих пор не были исследованы. В данной работе мы исследовали фотоотклик в структурах металл / МТГ / металл.

Изготовление образцов

Пленки МТГ были получены на пленках железа методом CVD при низком давлении с однократным напуском ацетилена [2]. После синтеза пленки были перенесены с помощью РММА на пластины кремния с оксидной пленкой толщиной 300 нм. С помощью электронной литографии, травления в плазме кислорода и операций «лифт-офф» из пленок МТГ были изготовлены двухтерминальные структуры для исследования фотоотклика. Схематическое изображение такой структуры показано на рис. 1.

Измерение фотоотклика

Для измерения фотоотклика двухтерминальный прибор был помещен на столик рамановского микроскопа. Лазерный луч с длиной волны 532 нм фокусировался на поверхность пленки с помощью 50-кратного объектива. Размер лазерного пятна составлял примерно 1,5 мкм. Мощность лазера — 20 мВт. Фототок или фотонапряжение измеряли с помощью источника измерителя Keithley 2450.

Для исследования фотоотклика в структуре при локальном освещении пятно лазера было установлено на один из электродов. С помощью моторизованного столика образец перемещали таким образом, что пятно лазера перемещалось с одного

электрода на другой, проходя через графеновый канал (траектория лазерного пятна по образцу показана на нижней вставке рис. 1). Во время перемещения пятна записывался фототок или фотонапряжение в канале прибора (рис. 1). Из рисунка видно, что фототок имеет несколько максимумов и минимумов при прохождении лазерного пятна с одного электрода на другой. Фототок возникает в образце из-за разности коэффициентов Зеебека соседних областей. В левой части кривой наблюдается увеличение тока, когда лазерное пятно проходит границу между электродом и пленкой МТГ. На правой границе раздела между пленкой многослойного твист-графена и электродом наблюдается увеличение тока противоположного знака. При прохождении лазерного пятна по пленке МТГ также наблюдается изменение знака фототока. Это может быть связано с изменением коэффициента Зеебека из-за структурной неоднородности пленки, вызванной изменением углов разворота соседних слоев.

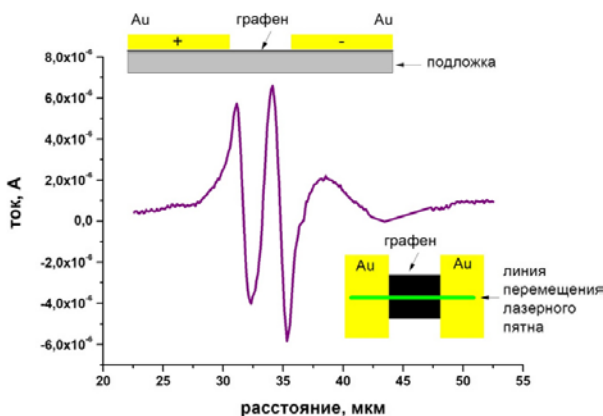


Рис. 1. Фотоотклик в двухтерминальной структуре при локальном освещении лазером

Показано, что линейность фотоотклика сохраняется в диапазоне более двух порядков и насыщение не наблюдается даже при плотности мощности лазера 2 МВт на квадратный сантиметр. Это говорит о том, что температура МТГ при облучении слабо отличается от температуры окружающей среды.

Заключение

Синтезированы пленки МТГ. Из них изготовлены двухтерминальные структуры металл / МТГ / металл для исследования фотоотклика. Результаты исследования фототермоэлектрического эффекта в пленках МТГ демонстрируют перспективность этого материала для создания на его основе фотодетекторов в широком диапазоне длин волн.

Литература

1. Xia F., Mueller T., Lin Y. M., Valdes-Garcia A., Avouris P. // Nat. Nanotechnol, 2009. Vol. 4. P. 839.
2. Brzhezinskaya M., Kononenko O., Matveev V., Zotov A., Khodos I. I., Levashov V., Volkov V., Bozhko S. I., Chekmazov S. V., Roshchupkin D. Engineering of Numerous Moiré Superlattices in Twisted Multilayer Graphene for Twistrionics and Straintrionics Applications // ACS Nan, 2021. Vol. 15. P. 12358–12366.

УДК 53.06

Перспективы применения наноуглеродных структур в микроэлектронике

Данилова Ю. Н.

ФГБУ «Центр экспертизы и координации информатизации»

123112, г. Москва, Пресненская наб., 12

yudanilova@apr.f.armgs.team

Рассмотрены перспективы использования в микроэлектронике наноуглеродных материалов, таких как графен и углеродные нанотрубки. Приведены примеры применения наноуглеродных материалов в приложении к микроэлектронике.

Ключевые слова: нанoeлектроника; графен; углеродные нанотрубки.

Введение

Действующее более полувека эмпирическое наблюдение Гордона Мура на сегодняшний день практически перестало работать из-за размерных эффектов. В связи с этим все больше ученых и инженеров ведут разработки в нанoeлектронике — области науки и техники, занимающейся созданием и исследованием электронных приборов с нанометровыми размерами элементов [1].

Одним из перспективных материалов для нанoeлектроники является наноуглерод, например графен и углеродные нанотрубки, которые обладают уникальными и рекордными свойствами электро- и теплопроводности [2].

Применение графена в электронике

Графен является хорошим проводником. Его электрофизические свойства могут изменяться при наличии на поверхности сорбирующих молекул, что используется при создании химических сенсоров. Примерами, иллюстрирующими эффективность графеновых сенсоров, могут служить работа [3], где показано, что проводимость графена изменялась на восемь порядков при сорбции аммиака, и работа [4], продемонстрировавшая регистрацию примесей молекул NO при концентрации в воздухе 10^{-14} .

Благодаря свойствам проводимости графен применяют при создании гибких экранов. Группа исследователей из Кореи и Японии разработала способ производства в промышленных масштабах двумерной графеновой пленки. Этот материал дешевле, прозрачнее и прочнее, чем оксид индия-олова (ITO), используемый в качестве прозрачного проводника.

Применение углеродных нанотрубок (УНТ) в электронике

УНТ представляет собой результат сворачивания гексагональной графеновой плоскости в цилиндр. Угол сворачивания относительно оси УНТ задает хиральность, которая, в частности, определяет ее электрические свойства. УНТ с кресельной структурой имеют металлический тип проводимости, прочие — полупроводниковый.

УНТ уже находят применение в электронике. Так, например, в 2016 году физики из Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли, университетов Калифорнии, Техаса и Стэнфорда создали транзистор с затвором из УНТ (рис. 2). Его длина составила 1 нм. Исследования показали, что ток утечки выключенного транзистора составляет одну миллионную часть от тока включенного транзистора. Значения сопоставимы со значениями для кремниевых транзисторов с большей величиной затвора [5].

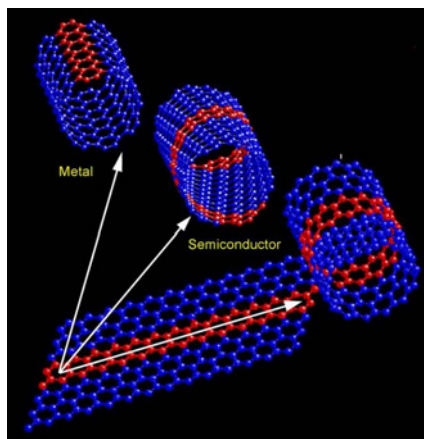


Рис. 1. Различные структуры и соответствующие типы электрической проводимости УНТ

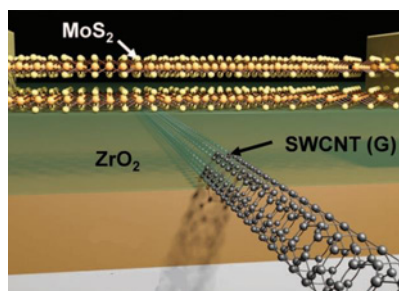


Рис. 2. Строение транзистора, где в роли канала выступает дисульфид молибдена, а в роли затвора — УНТ

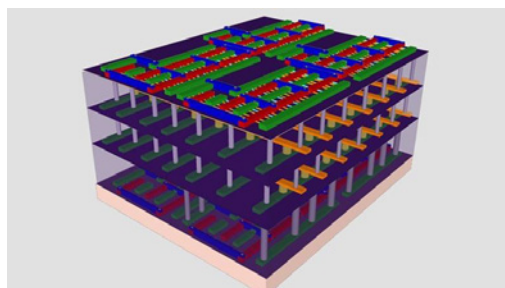


Рис. 3. 3DSoc-микросхема

Также стоит отметить, что американская компания SkyWater получила грант агентства DARPA на разработку 3DSoc-микросхем. Их ключевым элементом (рис. 3) являются межслойные переходы. Они на несколько порядков тоньше, чем другие виды межслойных соединений, что стало возможным благодаря использованию УНТ.

Заключение

Нанюглеродные материалы имеют перспективы применения в электронике и микроэлектронике. В разработке технологий на их основе заинтересованы лидеры рынка, такие как Intel и IBM.

Ведущиеся в мире разработки электронных и микроэлектронных технологий на основе нанюглеродов показывают результаты, сравнимые или превосходящие кремниевые технологии.

На данный момент эти технологии не отработаны и не адаптированы для массового производства. Исследователи выделяют ряд трудностей, которые необходимо преодолеть в будущем, например выращивание массивов УНТ только с определенной структурой.

Литература

1. Белоус А. И., Солодуха В. А. Материалы и устройства нанoeлектроники. — М.: Инфра-Инженерия, 2022. — 564 с.
2. Елецкий А. В. Нанюглерод: монография. — М.: Ваш Формат, 2022. — 166 с.
3. Antonova I. V., Mutilin S. V., Seleznev V. A. et al. Extremely high response of electrostatically exfoliated few layer graphene to ammonia adsorption // Nanotechnology, 2011.
4. Chen G., Paronyan T. M., Harutyunyan A. R. Sub-ppt gas detection with pristine graphene // Appl. Phys. Lett., 2012. — 2 Jun.
5. Sujay B. D. MoS₂ transistors with 1-nanometer gate lengths // Science, 2016. № 354. P. 99–102.

УДК 621.373.8

Создание электропроводящих наноинтерфейсов для биоэлектроники

Курилова У. Е.^{1,2}, Герасименко А. Ю.^{1,2}¹ *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России**119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2**kurilova_10@mail.ru*² *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Рассмотрен процесс изготовления интерфейсов для биоэлектроники на основе углеродных нанотрубок и биополимера, обработанных лазерным излучением. Наноинтерфейсы обладают высокой электропроводностью, биосовместимостью и значительно улучшают рост клеток сердца при электрической стимуляции.

Ключевые слова: биоэлектроника; углеродные нанотрубки; наноинтерфейсы; электропроводность; сканирующая электронная микроскопия; спектроскопия комбинационного рассеяния; электрическая стимуляция.

Введение

В настоящее время наблюдается широкий интерес научного сообщества к разработке биоэлектронных устройств, которые могут применяться как для диагностики различных патологий биотканей, так и для восстановления поврежденных тканей с помощью электрической стимуляции. Важным компонентом биоэлектронных устройств являются электропроводящие биосовместимые интерфейсы, которые без потерь проводят сигнал от жестких электронных генераторов импульсов к мягким биотканям. Для более точного считывания или передачи электрических импульсов необходимы интерфейсы с высоким разрешением электропроводящих компонентов, которые обеспечивают углеродные наноматериалы. Ориентированные углеродные нанотрубки могут являться компонентами наноинтерфейсов, передавая электрические импульсы биотканям с высоким разрешением и отношением сигнал/шум [1].

Процесс создания интерфейсов

Первым этапом изготовления электропроводящих наноинтерфейсов являлось выращивание массива многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) на кремниевой подложке. На полученный массив методом спрей-осаждения наносилась дисперсия бычьего сывороточного альбумина (БСА) в концентрации 5 масс. %, который использовался в качестве биосовместимой основы. Для увеличения электропроводности образцы обрабатывались импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм для ориентирования нанотрубок с одновременным их связыванием друг с другом в целях образования узлов перколяции, в результате чего в объеме интерфейса образовывался прочный электропроводящий наноуглеродный каркас.

Исследования физических и биологических свойств наноинтерфейсов

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) полученных образцов показала оборачивание МУНТ в каркасе молекулами альбумина, что повышает

биосовместимость конструкции интерфейса. Лазерное воздействие на нанотрубки приводит к образованию ковалентных связей между ними в участках дефектов их структуры [2]. Результаты СЭМ подтвердили образование связанного каркаса из нанотрубок. Экспериментально установлена плотность энергии импульсного лазерного воздействия, обеспечивающая структурирование МУНТ в матрице БСА, — 0,011–0,015 Дж/см². С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния было установлено, что в процессе лазерной обработки снижается дефектность нанотрубок, выбранная плотность энергии лазерного излучения не повреждает основную массу МУНТ.

Проведенные измерения электропроводности полученных нанointерфейсов указывают на увеличение электропроводности с ростом мощности лазерного воздействия, что объясняется увеличением количества связей между МУНТ в процессе лазерной обработки. Следовательно, необходимая электропроводность нанointерфейса может быть выбрана путем использования заданной мощности лазерного излучения. При увеличении мощности выше 0,017 Дж/см² наблюдается резкое падение электропроводности.

Электрическая стимуляция клеток оказывает влияние на мембранный потенциал клеток, активируя клеточный метаболизм. Исследования влияния электрической стимуляции клеток сердца на поверхности нанointерфейсов показало трехкратное увеличение количества клеток и отсутствие токсичности.

Заключение

Разработанные интерфейсы на основе углеродных нанотрубок и биополимера альбумина могут успешно использоваться для различных биоэлектронных применений, включая носимые устройства регистрации мозговой и сердечной активности, для стимуляции деятельности сердечной мышцы и периферических нервов и многих других.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственной поддержки создания и развития НИЦ мирового уровня «Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение» № 075-15-2022-304

Литература

1. Rastogi S. K. et al. Bioelectronics with nanocarbons // Journal of materials chemistry B, 2018. Vol. 6. № 44. P. 7159–7178.
2. Gerasimenko A. Y. et al. Electrically conductive networks from hybrids of carbon nanotubes and graphene created by laser radiation // Nanomaterials, 2021. Vol. 11. № 8. P. 1875.

УДК 661.665.1

Требования к порошкам карбида кремния для сублимационного роста монокристаллов 4Н-SiC и производства оснастки для микроэлектроники

Федосеев В. Н., Старков А. М., Ефремов Ю. П.

АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

142103, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24

Чистый порошок карбида кремния применяется при производстве оснастки для микроэлектроники и широкозонных полупроводников для силовой электроники. Производство такого порошка с чистотой 98 % и выше в России отсутствует. Создание такого производства является актуальным и должно начинаться с определения требований к порошкам. Помимо требований в докладе кратко описывается опыт предприятия по изготовлению оснастки для микроэлектроники из импортных порошков карбида кремния.

Ключевые слова: карбид кремния; широкозонный полупроводник; рост кристаллов 4Н-SiC; высокотемпературная оснастка для микроэлектроники; нано- и микропорошки карбида кремния.

Чистый карбид кремния применяется при производстве оснастки для микроэлектроники и широкозонных полупроводников для силовой электроники. Производство порошка карбида кремния с чистотой 98 % и выше в России отсутствует. Создание такого производства является актуальным и должно начинаться с определения требований к порошкам: общее содержание примесей, элементный состав, размеры частиц, их морфология, распределение по размерам, насыпная плотность, текучесть, фазовый состав, толщина поверхностной пленки SiO₂, которая влияет на активность порошка и величину pH раствора, и т.д. Выбор метода производства порошка (метод Ачесона, карботермическое восстановление кремния, прямой синтез порошков кремния и углерода, CVD, золь-гель, плазмохимия и др.) определяется этими требованиями, экономикой процесса и масштабами производства. Например, предел метода Ачесона по чистоте находится на уровне 5N.

Промышленной технологией для роста кристаллов карбида кремния (преимущественно 4Н-SiC) является физический транспорт паров PVT [1]. В качестве исходного сырья применяются порошки карбида кремния различного фазового состава. Для получения достаточно толстых булей желательно применять порошки с большими размерами частиц и насыпной плотностью на уровне 1,6 г/см³. Обычно считается, что для выращивания достаточно качественных проводящих кристаллов чистота порошка должна составлять 5.5N и выше, т.е. общее содержание примесей не должно превышать 5 ppm. Для роста полуизолирующих кристаллов HPSiC с удельным сопротивлением не менее 10⁹ Ом·см требуются порошки чистотой по крайней мере 6.5N. Указанные требования по чистоте практически исключают применение методов Ачесона, по крайней мере без дополнительной очистки. Китайская компания Fushel производит SiC-порошки с чистотой до 6N прямым синтезом порошков углерода и кремния при температуре выше 2000 °С.

При производстве оснастки для микроэлектроники возможны два подхода: изделия полностью из чистого карбида кремния или нанесение непроницаемого

чистого CVD-покрытия. Требования по чистоте материала оснастки зависят от конкретного термического процесса (эпитаксия, быстрые термические процессы RTP, травление, окисление, имплантация, диффузия, активация...). Японская компания Top-Seiko производит SiC-оснастку с чистотой не менее 3N. Среди основных методов производства чистой керамики — спекание с горячим (изостатическим) прессованием HPSiC/HPSiC, рекристаллизация RSiC. Нанопорошки и порошки субмикронного уровня являются предпочтительными, а чистота должна соответствовать категории Sinter Grade (спекание). CVD-покрытие американской компании Morgan (Performance SiC) характеризуется чистотой 5N5 и предназначено для RTP, травления, подложкодержателей, нагревательных элементов, носителей пластин для светодиодов, мишеней для распыления. Для получения чистого CVD-покрытия следует применять чистые прекурсоры. Это могут быть двухкомпонентные прекурсоры — метилтрихлорсилан MTS, гексаметилдисилан HMDS или два однокомпонентных прекурсора. Немецкая компания SGL наносит поликристаллическое покрытие 3C-SiC, используя тетрахлорид кремния SiCl₄ и метан CH₄ / этилен C₂H₄ или толуол C₇H₈ в зависимости от ориентации зерен. Газ-носитель — очищенный водород, температура — 1100 °C, давление — 10 кПа, содержание примесей ≤5 ppm.

В докладе кратко описывается опыт нашего предприятия по изготовлению оснастки для микроэлектроники — трубы диффузионные, кассеты, консоли для различных термических процессов. Указываются ограничения на применение нашей оснастки, в частности температура не должна превышать 1350 °C, а также описаны некоторые методы контроля материала.

Литература

1. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, characterization, devices, and applications. Singapore, Wiley, 2014. 555 p.

УДК 661.665

Карбид кремния для силовой электроники. Оценка российского и международного рынка. От шихты до силовой ячейки. Производство в России

Жилин А. А.

АО «НПО «Энергомодуль»

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 55, корп.31

Подготовлен обзор российского и международного рынка «Карбид кремния для силовой электроники от шихты до силовой ячейки». Оценка технологических возможностей по каждому технологическому этапу.

Ключевые слова: SiC; карбид кремния; шихта; слиток; дислокация; пластина; Mosfet-транзистор; силовой модуль; силовая.

Основной задачей силовой электроники является минимизация потерь энергии при преобразовании и управлении потоками электрической энергии. В промышленно развитых странах более 70 % всей вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи. Их суммарная установленная мощность вполне сопоставима с суммарной величиной генерирующих мощностей, поэтому технический уровень преобразователей ощущимо влияет на состояние всей энергетики. В России через полупроводниковые преобразователи проходит примерно 30 % электроэнергии, и увеличение этой доли до мирового уровня позволит экономить 12–15 % всей вырабатываемой электроэнергии. Ускоренное развитие силовой полупроводниковой преобразовательной техники является, пожалуй, одним из самых быстрых и наименее затратных путей ощутимого снижения энергоёмкости при производстве валового внутреннего продукта (ВВП). Эволюция технологий силовой электроники всегда двигалась в сторону более высокого КПД, более высокой плотности энергии и большей интегрированности систем. Силовые полупроводниковые устройства на основе карбида кремния (SiC) играют решающую роль в этой непрерывной эволюции.

Промышленные заказчики заинтересованы в создании сквозного проекта производства транзистора/диода Шоттки в России.

1. Рынок силовых приборов и модулей на основе карбида кремния является сегодня одним из самых быстрорастущих рынков с CAGR около 40–60 % в год. Основными драйверами роста являются электромобили, системы управления, преобразователи солнечной и ветряной электроэнергии.
2. Подложка карбида кремния является фактором, определяющим качество и себестоимость силовых приборов. Именно в связи с этим в США, Китае, Южной Корее, Японии и на Тайване делаются большие инвестиции в производство подложек. Нужно учитывать еще и геополитический фактор — все эти страны опасаются нестабильности в поставках подложек. Особенно критично к этому относятся в Китае, где создают полную цепочку поставок для производства силовых приборов от исходной шихты, графита и чистых газов до оборудования для всех этапов производства.
3. Лидерами рынка являются компании из США (Cree, II–VI), ведущие производство и поставки эпи-готовых подложек 6 и 8 дюймов. Однако ряд

крупных компаний из Китая (например, фирма Huawei), сталкиваются с ограничениями поставок подложек и силовых приборов, и активно инвестируют в создание собственного производства подложек и силовых приборов. Качество подложек, производимых ведущими китайскими компаниями (SICC, Tankeblue. Etc.), существенно ниже. Кроме того, в Китае пока не производятся подложки диаметром 8 дюймов.

Литература

1. YOLE development. Power SiC 2022. Market and Technology report.
2. YOLE development. Status of the Power Electronics Industry 2022. Market and Technology Report.
3. Roland Berger. YOFC Advanced Semiconductor Planning Project 2023.

УДК 621.382.3

Анализ конструкции p -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Дюканов П. А.^{1,2}, Кожухов М. В.^{1,3,4}, Попов Д. А.^{1,3}, Грушин А. И.²,
Исмаил-Заде М. Р.³

¹ Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3

² АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной пр., 27

dukanov@pulsarpp.ru

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

⁴ АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

107078, г. Москва, Хоромный тупик, 4

Рассмотрены три варианта конструкции p -канальных полевых транзисторов доступные для интегрирования в составе высоковольтного комплементарного биполярного технологического процесса. Результаты приборно-технологического моделирования сопоставлены с измеренными характеристиками изготовленных структур исследуемых полевых транзисторов.

Ключевые слова: полевой транзистор; биполярная технология; TCAD.

Введение

При разработке современных операционных усилителей для фотоэлектроники требуется сочетание ультранизкого уровня входного тока с высоким быстродействием и низким энергопотреблением [1]. Для достижения этих целей в рамках существующего комплементарного биполярного технологического процесса разработана конструкция полевого транзистора с управляющим p - n -переходом. Для получения SPICE-модели транзистора проводится расчет полупроводниковой структуры в Synopsys TCAD с последующей экстракцией основных электрофизических параметров [2].

Приборно-технологическое моделирование различных структур полевого транзистора

За основу разработки конструкции полевого транзистора использовался комплементарный биполярный технологический процесс с изоляцией обратносмещенным p - n -переходом и пробивным напряжением коллектор-эмиттер 30 В. В качестве экономичного, простого в реализации и радиационно стойкого решения был выбран p -канальный полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (рис. 1). При оптимизации параметров технологического процесса и габаритных размеров топологии транзистора в качестве критериального параметра было выбрано напряжение отсечки ($U_{отс}$) в диапазоне 1,0–1,5 В.

В процессе расчета были получены выходные характеристики и электрические параметры для трех вариантов конструкции полевого транзистора отличающихся максимальными концентрациями в областях канала (N_A) и затвора (N_D). В варианте №1 получены значения $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в варианте

№ 2 — $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и в варианте № 3 — $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Проведено сравнение промоделированных выходных характеристик с характеристиками изготовленных структур (рис. 2). Погрешность расчета по сравнению с экспериментом не превышает 15 %.

Проведен расчет отклонения основных электрических параметров вариантов структур № 2 и № 3 для крайних точек разброса параметров технологического процесса.

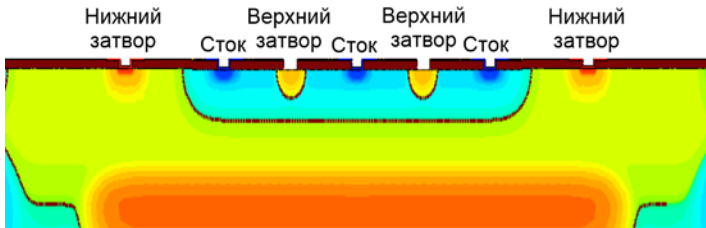


Рис. 1. Боковое сечение p -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

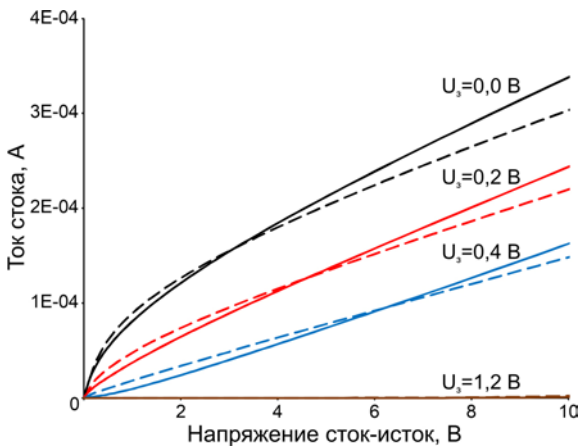


Рис. 2. Выходные характеристики p -канальных полевых транзисторов (сплошная — модель, пунктир — эксперимент)

Анализ вариантов конструкции полевого транзистора

Результаты моделирования показали, что из трех рассмотренных конструкций:

- вариант № 1 не позволяет обеспечить значение критериального параметра, $U_{отс}$ превышает 10 В;
- вариант № 2 обеспечивает $U_{отс} = 1,2 \text{ В}$, остальные параметры позволяют обеспечить работу в диапазоне напряжений до 33 В и входной ток на уровне 10 пА;

- вариант № 3 при подгонке режима формирования затвора позволяет обеспечить $U_{отс} = 1,5$ В. При этом увеличивается площадь p - n -перехода, что повышает входной ток до 20 пА и негативно сказывается на емкости затвора.

Из рассмотренных решений p -канального полевого транзистора наиболее подходящим для интеграции в комплементарный биполярный технологический процесс и разработки выбран вариант № 2.

Заключение

Анализ нескольких вариантов конструкции p -канального полевого транзистора позволяет создать приборно-технологическую модель с оптимальными характеристиками, необходимыми для разработки аналоговых интегральных микросхем. Расчет устойчивости модели к разбросу параметров технологических процессов может быть применен для интеграции полевого транзистора в другие технологические процессы, увеличения процента выхода годных изделий и лечь в основу метода сокращения времени на процессы разработки и анализа технологического брака с применением методов машинного обучения.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№23-22-00313)

Литература

1. Хоббс Ф. С. Д. Усилители для фотодиодов на операционных усилителях // Компоненты и технологии, 2009. — № 2. — С. 46–50.
2. Дроздов Д. Г., Прокопенко Н. Н., Савченко Е. М., Дюканов П. А., Грушин А. И. Исследование высоковольтных комплементарных полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом в диапазоне температур с помощью методов приборно-технологического моделирования // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2020. — С. 66–75.

УДК 621.382.32

SPICE-моделирование ВАХ полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом в сверхшироком диапазоне температур

Горбунов К. А., Исмаил-Заде М. Р.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)*

123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

mismailzade@hse.ru

В работе исследованы электрические характеристики и определены основные параметры полевого транзистора с управляющим p - n -переходом в диапазоне температур $-243...+150^\circ\text{C}$. Доработана стандартная SPICE-модель уровня 3 транзистора, предназначенная для расчета электронных схем с учетом влияния температуры.

Ключевые слова: сверхширокий диапазон температур; JFET-транзистор; SPICE-модель; определение параметров модели.

Введение

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (JFET) благодаря высоким входному сопротивлению и усилению, низкому уровню собственных шумов широко используется во входных и последующих каскадах малошумящих операционных усилителей, вторичных источников питания, стабилизаторов и других аналоговых микросхем экстремальной электроники [1].

Качество проектирования таких схем существенно зависит от точности моделей элементов схем, которая существенно ухудшается при необходимости учета сверхширокого диапазона температур.

Целью данной работы является повышение точности SPICE-моделирования JFET транзистора на основе экспериментального исследования ВАХ в диапазоне температур $-243...+150^\circ\text{C}$.

Экспериментальные исследования характеристик

Для экспериментального исследования ВАХ в сверхшироком диапазоне температур использовался коммерческий кремниевый Si n -JFET транзистор BF545B в пластиковом корпусе SOT23 для поверхностного монтажа [2] с напряжением питания 15 В.

На первом этапе проводились измерения статических характеристик JFET в диапазоне $T = -60...+150^\circ\text{C}$ с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса. На втором этапе были проанализированы ВАХ JFET BF545B в диапазоне температур $-243...+25^\circ\text{C}$ на основе опубликованных литературных данных [3].

По полученным результатам были определены изменения основных параметров JFET транзистора с температурой (абсолютного сдвига напряжения отсечки и относительного изменения крутизны) (см. рис. 2).

Модель Si JFET с учетом сверхширокого диапазона температур

Ранее нами была предложена модифицированная компактная SPICE-модель Si JFET [4] для широкого диапазона температуры ($-200...+110^{\circ}\text{C}$), которая включала в себя температурно-зависимые параметры; ядром этой модели являлась встроенная в spice стандартная модель JFET уровня 3 (level = 3). В данной работе была проведена коррекция модели [4] для сверхширокого диапазона температуры $-243...+150^{\circ}\text{C}$.

Температурно-зависимыми являются параметры модели, отвечающие за напряжение отсечки (V_{TO}), крутизну ($BETA$), коэффициент модуляции длины канала ($LAMBDA$) и коэффициент насыщения ($ALPHA$).

При изменении температуры параметры V_{TO} и $ALPHA$ меняются в соответствии с полиномиальной функцией вида:

$$\Delta f_i(T) = n_0 + n_1(\Delta T) + n_2(\Delta T)^2 + \dots \quad (1)$$

Для учета особенностей поведения $LAMBDA$ и $BETA$ при низких температурах в данной модели была введена новая аналитическая функция зависимостимом диапазоне:

$$\frac{p(T)}{p(T_{nom})} = \frac{1}{k_0 + k_1(T/T_{nom}) + k_2(T/T_{nom})^2 + \dots}, \quad (2)$$

где $n_0, n_1, n_2, k_0, k_1, k_2$ — подгоночные коэффициенты; T — температура в К, T_{nom} — нормальная температура в К.

Определение температурно-зависимых параметров базовой SPICE-модели и дополнительных коэффициентов в выражениях (1) и (2) проводилась с помощью промышленного САПР IC-CAP.

Возможности модели по точности описания ВАХ в диапазоне температур $-243...+150^{\circ}\text{C}$ проиллюстрированы на рис. 1а, б для дискретного n -JFET BF545B с напряжением питания 15 В. Погрешность моделирования ВАХ составляет не выше 15% во всем температурном диапазоне.

Сопоставление результатов расчета параметров модели по экспериментальным и по смоделированным характеристикам транзистора приведено на рис. 2.

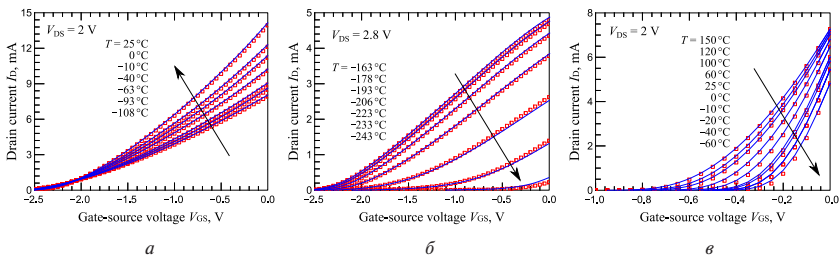


Рис. 1. Сопоставление результатов моделирования (линии) с литературными данными (символы) [3] сток-затворных ВАХ JFET BF545B в диапазонах $T = -108...+25^{\circ}\text{C}$ (а) и $T = -243...-163^{\circ}\text{C}$ (б). Измеренные (символы) и смоделированные (линии) сток-затворные ВАХ JFET BF545B в диапазоне $T = -60...+150^{\circ}\text{C}$ (в)

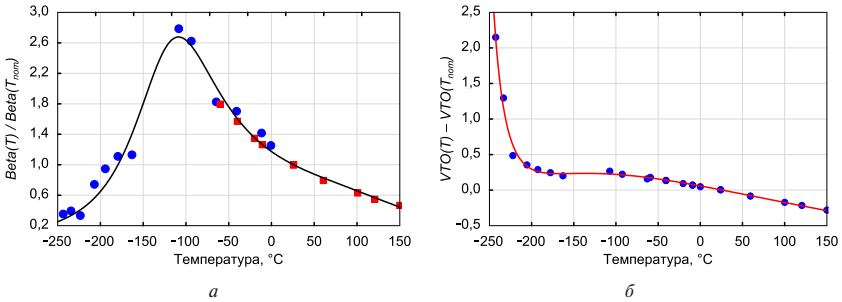


Рис. 2. Зависимости крутизны $BETA$ (а) и напряжения отсечки VTO (б) JFET транзистора BF545B от температуры T (символы — вычисления по измеренным данным, сплошные линии — аппроксимация)

Заключение

Исследованы характеристики JFET транзистора с учетом влияния сверхширокого диапазона температур ($-243...+150$ °C). На основе экспериментальных ВАХ доработана SPICE-модель JFET Level 3, предназначенная для расчета электронных схем в диапазоне температуры от сверхнизких до сверхвысоких. По измеренным данным определены изменения основных параметров модели с температурой. Погрешность моделирования ВАХ составила не выше 15% во всем температурном диапазоне.

Литература

1. Cressler J. D. and Alan Mantooth, Extreme Environment Electronics, CRC Press, November, 2012, 1041.
2. NXP data sheet, document identifier: BF545A-BF545B-BF545C, NXP B.V. (2011).
3. Kavangary A. et al. Temperature dependent electrical characteristics of a junction field effect transistor for cryogenic sub-attoampere charge detection, AIP Adv. 9 (2) (2019) 025104.
4. Петросянц К. О., Исмаил-Заде М. Р., Самбурский Л. М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника, 2019. — Т. 24. — № 2. — С. 174–184.

УДК 537.312.7

Моделирование мемристорных структур для формирования элементной базы нового поколения

Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

niime@niime.ru

Проанализированы проблемы надежности мемристорной элементной базы и возможные пути решения. Рассмотрен подход к созданию цифрового двойника мемристора и повышение надежности мемристорных структур на его основе.

Ключевые слова: мемристор; цифровой двойник; нейроморфные вычисления; оксид гафния; элементная база.

В настоящее время создание цифровых двойников различных процессов и элементов микроэлектроники является одной из важнейших задач. В частности, построение таких моделей необходимо для исследования и разработки мемристорных структур [1–2]. На сегодняшний день одними из наиболее актуальных материалов для формирования мемристорных структур являются оксид гафния, нитрид кремния [3]. Компанией TSMS в марте 2023 года был разработан 11-битный мемристор на основе оксида гафния. Тем не менее, остается открытым вопрос надежности подобных структур. Соответственно, необходимы дальнейшие исследования в этой области. Одним из возможных решений данной проблемы может стать построение модели цифрового двойника. Это позволит определить оптимальные параметры технологических процессов для изготовления подобных структур, а также определить электрические параметры для задания режима работы мемристора, обеспечивающего надежность структур.

Нейроморфные вычислительные системы на основе мемристоров предполагают высокоэффективную реализацию векторно-матричного умножения, обычно используемого в искусственных нейронных сетях [4]. Однако, процесс изготовления мемристоров недостаточно оптимизирован, присутствует высокий процент брака, вариация параметров от устройства к устройству, что, в конечном итоге, приводит к снижению надежности этих устройств и, таким образом, препятствует их широкому распространению.

Для создания цифрового двойника такого устройства необходимо учитывать уравнения, описывающие механизм транспорта носителей заряда через активный слой мемристора с учетом толщины активного слоя и технологии изготовления, процессы ионной миграции между активным слоем и электродами. В качестве материалов электродов могут быть рассмотрены Pt, TiN, TaN и другие. Важнейшим вопросом становится влияние токов утечки на возникновение необратимого пробоя [5], в связи с чем, необходимо моделирование различных толщин активного слоя с различными материалами верхнего электрода, а также моделирование электрических параметров работы устройства, которые позволят снизить влияние токов утечки на деградацию структур [6], таких как ширина и амплитуда импульса переключения, время нарастания и спада импульса, время задержки между импульсами.

Литература

1. Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications / D. Ielmini, R. Waser (Eds.). — Weinheim: Wiley-VCH, 2016. 784 p.
2. Strukov D. B. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. P. 80–83.
3. Vourkas I., Sirakoulis G. Ch. Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures. Berlin-Heidelberg: Springer, 2015. 241 p.
4. Zhu L. et al. An overview of materials issues in resistive random access memor // J. Materiomics, 2015. Vol. 1 (№ 4). P. 285–295.
5. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
6. Mehonic A., Kenyon A. J. Resistive Switching in Oxides // Defects at Oxide Surfaces. J. Jupille, G. Thornton (Eds.). Cham: Springer, 2015. P. 401–428.

УДК 621.382

Применение технологии СБИС на основе на основе ультратонких КНИ-структур для космической и специальной аппаратуры

Лагаев Д. А.¹, Ключников А. С.¹, Шелепин Н. А.²¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
dлагаev@niime.ru² Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11

Приведены результаты исследований тока утечки в зависимости от величины поглощенной дозы ИИ для n -канального КНИ МОП-транзистора с тонкими слоями приборного кремния и скрытого оксида. С использованием компьютерного моделирования продемонстрировано, что стойкость n -канального транзистора к поглощенной дозе ИИ составляет не менее 70 кРад по критерию увеличения тока утечки в пять раз.

Ключевые слова: UTBB FD-SOI; полностью обедненный n -канальный транзистор; поглощенная доза ИИ; радиационная стойкость; ток утечки; технология.

Широкое распространение при разработке изделий специального и космического назначения получила технология Кремний на изоляторе (КНИ) за счет отсутствия межтранзисторных токов утечки, тиристорного эффекта и снижения размеров областей, чувствительных к попаданию отдельных заряженных частиц. Однако, наличие полной диэлектрической изоляции является причиной возникновения внутритранзисторных токов утечки с ростом величины поглощенной дозы ионизирующего излучения (ИИ). Отметим, что заряд, накапливаемый в объеме диэлектрика, имеет положительный знак, формирование инверсных областей, и как следствие возникновение радиационно-индуцированных компонент тока утечки, возникает вдоль границ оксидов кремния с приборным слоем кремния в n -канальных КНИ МОП-транзисторах [1, 2].

Существенный интерес представляет технология, позволяющая реализовывать полностью обедненные транзисторы с ультратонкими слоями приборного кремния и скрытого оксида (Ultra Thin Body and BOX Fully Depleted Silicon on Insulator — UTBB FD-SOI) [3]. Несмотря на результаты, представленные в работе [4] из которых следует, что снижение проектных норм ниже 32 нм приводит к снижению стойкости изделия по параметру поглощенной дозы, ряд компаний продолжают вести работы по проектам, на основе технологии FD-SOI. Это работы в области разработки радиационно стойкой библиотеки элементов на базе технологии 22-FDX от компании *GlobalFoundries* (проект DARE-22) и высокопроизводительных микропроцессорных систем для космоса на базе технологии *STMicroelectronics* (проект DANLIA 28). Интерес к технологии CMOS FD-SOI также был проявлен отечественной компанией «ПКК Миландр». Основные результаты испытаний тестового кристалла, в состав которого входили массивы памяти, тестовые ячейки памяти и цепочки триггеров были доложены на конференции «Микроэлектроника 2021» и опубликованы в [5].

В представленной работе с помощью среды приборно-технологического моделирования проведено исследование влияния низкоинтенсивного ионизирующего излучения на величину радиационно-индуцированного тока утечки, протекающего вдоль границы между приборным слоем кремния и скрытым оксидом. В качестве объекта исследования выступает *n*-канальный КНИ МОП-транзистор с длиной затвора 28 нм, который входит в состав схем памяти. Для выбранного транзистора было проведено моделирование процесса захвата положительного заряда на глубоких ловушках в скрытом оксиде в результате воздействия ИИ. Определен наихудший режим облучения (РО) с точки зрения величины захваченного заряда в скрытом диэлектрике. Получены зависимости тока утечки от величины поглощенной дозы ИИ, анализ которых позволил заключить, что превышение тока утечки в пять раз относительно исходной величины фиксируется для поглощенной дозы ИИ порядка 70 кРад. Увеличение утечки в 10 и 100 раз фиксируется для величин поглощенной дозы ИИ порядка 115 кРад и 285 кРад.

Полученные результаты подтверждают высокую радиационную чувствительность *n*-канальных транзисторов со структурой FD-SOI к поглощенной дозе ИИ по параметру тока утечки. Вместе с тем, полученные зависимости показывают, что использование технологии UTBB FD-SOI для разработки схем специального и космического назначения допустимо. В частности, допускается ее использование при разработке СБИС, входящих в состав бортовой аппаратуры космических аппаратов, функционирующих на геостационарной и низкой околоземной орбитах.

Литература

1. Селецкий А. В., Шелепин Н. А. Проектирование и разработка элементов КМОП СБИС, предназначенных для функционирования в условиях воздействия космических ионизирующих излучений // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016. — № 2. — С. 39–45.
2. Schwank J. R. et al. Radiation effects in SOI technologies // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003. Vol. 50. № 3. P. 522–538.
3. Mazure C. Advanced substrate engineering for the nanotechnology era // 2006 International Symposium on VLSI Technology, Systems, and Applications. IEEE, 2006. P. 1–2.
4. Hughes H. et al. Total ionizing dose radiation effects on 14 nm FinFET and SOI UTBB technologies // 2015 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). IEEE, 2015. P. 1–6.
5. Новоселов А. Ю. Результаты исследования тестового кристалла по технологии 22 нм SOI FD и перспективы разработки радиационно стойких ИМС на ее основе // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 266–267. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.266.267. EDN TVAZAF.
6. Тихомиров П., Пфеффли П., Боргес Р. Моделирование деградации и обратимых отказов полупроводниковых приборов с использованием TCAD Sentaurus // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2015. — № 10. — С. 142–149.

УДК 621.382

Исследование особенностей резистивного переключения в мемристорных структурах на основе оксидов переходных металлов

Ганыкина Е. А.^{1,2}, Резванов А. А.^{1,2}, Зюзин С. С.^{1,2}, Горнев Е. С.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
eganykina@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В настоящей работе представлены результаты моделирования резистивного переключения в элементах хранения на основе оксидов гафния и тантала методом конечных элементов и методом Монте-Карло. Результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследовании изготовленных образцов.

Ключевые слова: резистивное переключение; оксид гафния; оксид тантала; филамент.

Введение

В настоящее время одним из основных направлений развития микро- и наноэлектроники является разработка новой энергонезависимой памяти с низким энергопотреблением и высокой скоростью работы [1]. Для решения данной задачи последние пару десятилетий активно изучаются различные виды энергонезависимой памяти, в том числе и резистивная ReRAM-память. Однако основной проблемой, ограничивающей использование данной технологии, является изменчивость основных параметров элементов хранения, что объясняется стохастическим характером роста и разрыва филаментов. В связи с этим необходимы более детальные исследования физических процессов, происходящих в мемристорах.

Экспериментальные данные

В ходе работы были изготовлены образцы элементов хранения на основе оксидов тантала и гафния. Оксид тантала наносился методом магнетронного распыления, а оксид гафния — атомно-слоевым осаждением. Электрические характеристики мемристорных структур измерялись с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Полученные вольт-амперные характеристики мемристорных структур, снятые в импульсном режиме, показаны на рис. 1.

Все изготовленные элементы хранения продемонстрировали наличие резистивного переключения. Мемристорные структуры на основе оксидов тантала и гафния показали хорошую стабильность (было достигнуто 10^6 переключений в импульсном режиме) и повторяемость.

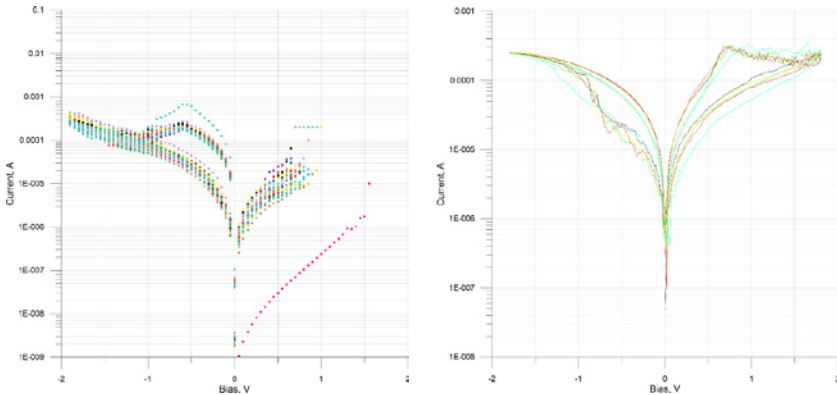


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики структур Ta/TaO_x/Pt (слева) и Pt/HfO₂/TiN (справа)

Моделирование резистивного переключения

Процесс резистивного переключения в случае использования оксидов гафния и тантала в качестве активного слоя объясняется миграцией кислородных вакансий, вызванной локальным электрическим полем и температурой [2]. Для учета стохастичности таких процессов как генерация, рекомбинация и диффузия кислородных вакансий, использовался кинетический метод Монте-Карло. Моделирование начинается с задания случайного начального распределения кислородных вакансий в активном слое. В каждом цикле уравнения Пуассона и непрерывности решаются самосогласованно для вычисления электрического поля и вероятностей занятия электронами ловушек. Далее, рассчитанный по механизму туннелирования через ловушки ток используется для вычисления локальной температуры путем решения уравнения теплопроводности. Используя полученные локальные потенциал и температуру, с помощью кинетического метода Монте-Карло определяется, какой из процессов — генерация, рекомбинация или диффузия — произойдет на следующем этапе [3].

Полученные в ходе моделирования вольт-амперные характеристики были сопоставлены с вольт-амперными характеристиками изготовленных экспериментальных образцов. Результаты моделирования коррелируют с экспериментальными данными, что позволяет говорить об адекватности работы предложенной модели и возможности ее применения для мемристорных структур различного состава.

Выводы

В данной работе были изготовлены образцы элементов хранения резистивной памяти, которые продемонстрировали стабильное резистивное переключение. Также была предложена математическая модель резистивного переключения в мемристорных структурах на основе оксидов переходных металлов, учитывающая диффузию, дрейф и термодиффузию кислородных вакансий, которая была верифицирована на полученных экспериментальных данных. Данная модель позволяет улучшить понимание основных физических факторов процесса резистивного переключения, что имеет решающее значение для дальнейшей оптимизации и проектирования такого класса устройств.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
2. Larentis S. et al. Resistive switching by voltage-driven ion migration in bipolar RRAM—Part II: Modeling // IEEE Transactions on Electron Devices, 2012. Vol. 59. № 9. P. 2468–2475.
3. Abbaspour E. et al. KMC simulation of the electroforming, set and reset processes in redox-based resistive switching devices // IEEE transactions on nanotechnology, 2018. Vol. 17. № 6. P. 1181–1188.

УДК 621.793.162

Численное моделирование процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения слоев оксидов гафния и циркония

Зюзин С. С.^{1,2}, Резванов А. А.^{1,2}, Зассеев Я. Г.³, Гвоздев В. А.¹, Ганькина Е. А.^{1,2}, Горнев Е. С.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 11
szuzin@niime.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «НИИТМ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10

Рассмотрена модель процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения слоев оксидов гафния и циркония, основанная на методе Монте-Карло и подробно учитывающая кинетику осаждения. Проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными на собственной установке атомно-слоевого осаждения.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; ALD; плазма; оксид гафния; оксид циркония; моделирование; Монте-Карло; конформность.

Введение

Технология атомно-слоевого осаждения играет важнейшую роль в производственных процессах создания широкого диапазона электронных компонентов и устройств [1]. В частности, плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение (PEALD) является ключевым методом нанесения тонких пленок различных материалов благодаря возможности управления структурой пленки при нанометровых и субнанометровых толщинах. Указанные свойства PEALD важны при изготовлении транзисторов MOSFET, а также ячеек памяти ReRAM, FeRAM и др. [2, 3] Несмотря на растущий интерес ученых, определение оптимальных параметров и условий процесса осаждения остается сложной и затратной задачей, как из-за высоких материальных и временных затрат, так и из-за жесткой санкционной политики. Поэтому для решения подобных задач все чаще применяют методы компьютерного или численного моделирования [4, 5]. В данной работе представлена модель осаждения слоев оксида гафния на кремниевой подложке. Использованные упрощения позволяют достаточно точно описать процесс при значительном улучшении эффективности вычислений. Полученные результаты моделирования согласуются с результатами экспериментов по осаждению слоев оксида гафния на собственной установке Изофаз ТМ 200-01 [6].

Моделирование

Модель основана на кинетическом методе Монте-Карло, предполагающем случайный выбор реакции из набора возможных приповерхностных реакций. Для такого выбора используется ВКЛ-алгоритм, именуемый также n -вложенным [7]. Сначала определяется список N возможных событий в системе, вычисляются их константы скоростей. Затем по формуле (1) рассчитывается суммарная скорость набора:

$$R_{TOT} = \sum_{m=1}^N R_m, \quad m=1, \dots, N, \quad (1)$$

где R_m — это скорость m -й реакции из набора. Затем генерируются два случайных равномерно распределенных числа p_1 и p_2 в интервале $(0,1]$, посредством которых осуществляется выбор следующего события q по формуле (2) и обновление таймера системы по формуле (3):

$$\sum_{m=1}^{q-1} R_m \leq p_1 R_{TOT} \leq \sum_{m=1}^q R_m, \quad (2)$$

$$t_{new} = t_{old} + \frac{-\ln p_2}{R_{TOT}}. \quad (3)$$

Список возможных событий в предложенной модели включает в себя адсорбцию и десорбцию прекурсора и кислорода, миграцию адсорбированного прекурсора по поверхности, окисление («удаление» лиганда), миграцию атома гафния с двумя лигандами по поверхности и его же «уплотнение» (когда атом «опускается» на уровень ниже с удалением одного лиганда).

Результаты по скорости роста за цикл (GPC) и неравномерности толщины пленки по пластине (СКО), полученные с помощью оригинальной модели для слоя HfO_2 , представлены на рис. 1. При базовой температуре осаждения, используемой на экспериментальной установке (300°C) скорость роста за цикл составляет $1,1 \text{ \AA}/\text{цикл}$, неравномерность толщины пленки по пластине $2,21 \%$. Полученные результаты коррелируют с экспериментальными данными ($1,149 \text{ \AA}/\text{цикл}$, $0,99 \%$), что подтверждает правильность модели и возможность ее дальнейшего применения.

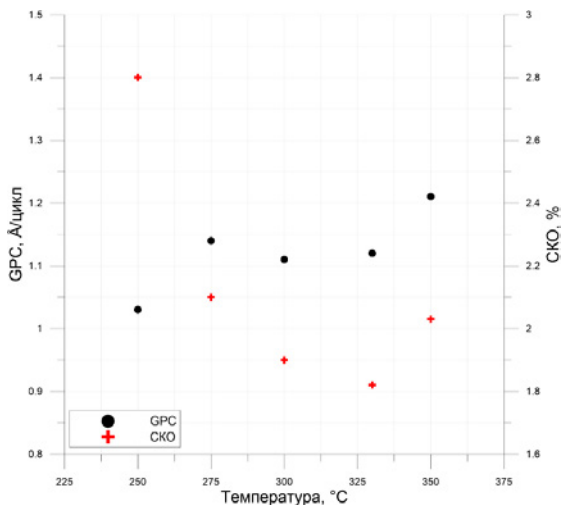


Рис. 1. Данные по скорости роста за цикл и неравномерности толщины пленки HfO_2 по пластине, полученные с помощью оригинальной модели

Заключение

Оценка ключевых характеристик слоев (скорость роста, шероховатость) показывает хорошее соответствие представленной модели с реальными результатами. Модель может быть успешно применена для анализа процесса осаждения и прогнозирования базовых характеристик слоев оксида гафния и циркония.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // *Российские нанотехнологии*, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Moll J. L., Tarui Y. A new solid state memory resistor // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1963. Vol. 10. № 5. P. 338–338.
3. Tian X. et al. Evolution of ferroelectric HfO_2 in ultrathin region down to 3 nm // *Applied Physics Letters*, 2018. Vol. 112. № 10. P. 102902.
4. Amar J. G. The Monte Carlo method in science and engineering // *Computing in science & engineering*, 2006. Vol. 8. № 2. P. 9–19.
5. Ding Y. et al. Machine learning-based modeling and operation of plasma-enhanced atomic layer deposition of hafnium oxide thin films // *Computers & Chemical Engineering*, 2021. Vol. 144. P. 107148.
6. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз ТМ 200-01» // *Наноиндустрия*, 2022. — Т. 15. — № S8-2. — С. 548–552.
7. Bortz A. B., Kalos M. H., Lebowitz J. L. A new algorithm for Monte Carlo simulation of Ising spin systems // *Journal of Computational Physics*, 1975. Vol. 17. № 1. P. 10–18.

УДК 621.382

Использование обратно рассеянных электронов для улучшения разрешения Fin-слоя методом моделирования

Тихонова Е. Д.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
yelena.tikhonova@phystech.edu² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена улучшению методов мониторинга и контроля качества обработки Fin-слоев. Используя обратно рассеянные электроны и вычислив расстояния между соседними «плавниками», вариации шагов у «плавников» и проанализировав эффект наложения была выявлена основная причина повреждения «плавника». Благодаря этому стало возможно уменьшить влияние дефекта на итоговые структуры и улучшить процессное окно.

Ключевые слова: фотолитография; разрешающая способность; самосовмещенное двойное паттернирование; обратно рассеянные электроны; СЭМ; ПЭМ.

Введение

Постоянное развитие микроэлектроники и полупроводниковой промышленности привело к созданию устройств с высокоскоростной памятью, мощной вычислительной производительностью и более низкой стоимостью в расчете на один транзистор. Такая доступность обуславливается уменьшением критических размеров (Critical Dimension, CD) транзисторов и улучшением разрешения литографического процесса. Основными методами повышения разрешающей способности выступают: коррекция эффектов оптической близости, внеосевое освещение, фазосдвигающие шаблоны и мультипаттернирование (multipatterning, MP), в частности самосовмещенное двойное (Self-Aligned Double Patterning, SADP) и четырехкратное паттернирование (Self-Aligned Quadruple Patterning, SAQP) [1].

При производстве Fin-FET-транзисторов часто применяют метод самосовмещенного двойного паттернирования совместно с процессом подрезания в Fin-слое для получения желаемых структур [2]. В логических областях микросхемы на данный процесс накладываются достаточно жесткие ограничения в соответствии с требованиями конструкции устройства, в связи с чем вышеупомянутый процесс усложняется, и увеличивается количество ошибок. Повреждения в Fin-слое неизбежно влияют на производительность устройств, поскольку «плавник» выступает в качестве канала, по которому происходит движение носителей тока, в связи с чем становится актуально улучшение методов мониторинга и контроля качества обработки Fin-слоев [3].

Использование обратно рассеянных электронов для улучшения разрешения Fin-слоя

Для проверки качества применяется специально разработанный технологический процесс, упоминаемый в работах [4] и [5], в котором применяется метод самосовмещенного двойного паттернирования с процессом подрезания. Вначале

выполняется фотолитография и травление мандрел (Mandrel, MD), затем наносится спейсер, производится обратное травление, удаляются мандрелы и протравливаются «плавники», после чего удаляются ненужные линии для получения желаемой структуры.

В процессе работы было обнаружено, что после подрезания в плавнике появляется дефект, напоминающий «мышинный укус» (рис. 1). Как проиллюстрировано на рис. 1а, количество дефектов увеличивается с ростом радиуса пластины, причем расстояние от края SOC до края поврежденного плавника меньше, чем у других плавниковых структур повторяющегося блока. На рис. 1б показана проверяемая область в кадре экспозиции размером 23×33 мм, а на рис. 1в–г можно наблюдать физический профиль повреждения «плавника».

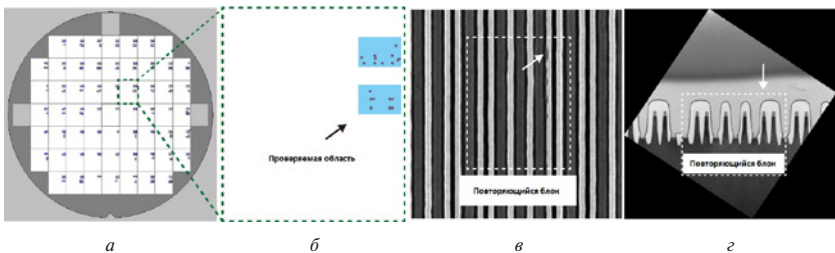


Рис. 1. Характеристика повреждения «плавника»: распределение дефектов (а), проверяемая область в кадре (б), просмотренное с помощью СЭМ изображение (в) и ПЭМ-изображение повторяющегося блока (г)

Чтобы лучше исследовать данные явления, процесс травления приостановлен на этапе травления SOC, и взято соответствующее изображение со сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис. 2а). Однако при использовании вторичных электронов плавников под слоем SOC не видно, в связи с чем было решено использовать обратно рассеянные электроны (рис. 2б–е). При действии обратно рассеянных электронов изображение образца зависит от атомного номера. Поскольку доминирующим элементом плавника является кремний, а SOC — это углерод, то разница в атомных номерах дает возможность различать их. Из рисунка ниже видно, что с увеличением рабочего напряжения появление плавника становится более заметным.

Определившись с методикой измерения, необходимо было выяснить первопричину дефектов. Для этого были исследованы: расстояние от края SOC до плавника, промежуток между соседними плавниками и критическим размером SOC, точность позиционирования диаграммы направленности между данным и текущим слоями и погрешность измерения шага плавников. Анализ данных показал, что повреждение плавника, вызванное недостаточным покрытием SOC, всесторонне зависит от меньшего расстояния от края SOC до плавника, совмещения слоев и изменением шага плавников.

Для поправок применяются модели линейной аппроксимации и аппроксимации третьего порядка. Это обеспечивает устранение повреждения «плавника» даже при минимальном критическом размере.

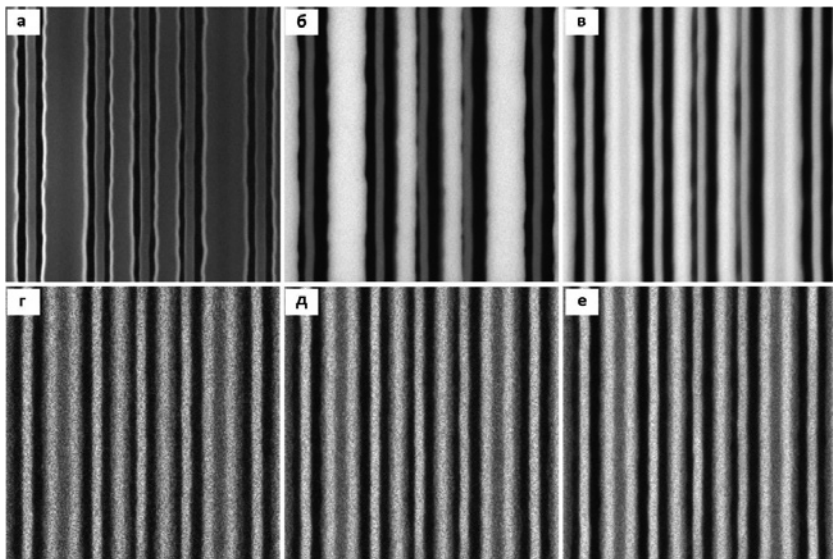


Рис. 2. Изображения линий: при использовании вторичных электронов (а), при использовании обратно рассеянных электронов на 64 кадрах при 5 кВ (б), 12 кВ (в) и 25 кВ (е), на 16 кадрах (г), на 32 кадрах (д) и на 64 кадрах (е) при 25 кВ

Заключение

Таким образом, было показано, что обратно рассеянные электроны можно использовать для обнаружения дефектов в плавниковых структурах, и с помощью данной методики реализовать более точный метод управления и контроля технологического процесса.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
2. Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Равилов М. Ф. и др. Анализ разработанных зарубежных изделий микросистемной техники // Микросистемная техника, 2002. — № 7. — С. 6–11.
3. Тихонова Е. Д. Улучшение технологии оптимизации маски и источника излучения в фотолитографии посредством математического моделирования // Современные материалы, техника и технология: сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции, Курск, 30 декабря 2021 года. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. — С. 435–437.
4. Тихонова Е. Д., Горнев Е. С. Использование материала spin-on-carbon для улучшения метода самосовмещенного двойного паттернирования // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-3 (102). — С. 859–861.
5. Тихонова Е. Д. Моделирование профиля фоторезиста в процессе самосовмещенного двойного паттернирования с учетом коррекции проблемы горячих точек // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2 (113). — С. 602–604.

УДК 531.7.08

Оптимизации шероховатости боковых стенок топологических элементов. Постановка задачи и подходы к решению

Шамин Е. С.^{1,2}, Шарапов А. А.^{1,2}, Скуратов И. Д.^{1,2}, Горнев Е. С.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
eshamin@niime.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе представлено описание оригинальной модели шероховатости боковых стенок элементов интегральных схем, основанной на моделировании воздушного изображения фотолитографии, а также имитационного моделирования резиста. Для описанной модели выводится ряд утверждений, позволяющих связать характеристики шероховатости с параметрами фотолитографии и свойствами применяемых в техпроцессе материалов. На основе одного из приведенных утверждений, проводится оптимизация шероховатости за счет максимизации slope воздушного изображения. Проводится анализ полученных результатов оптимизации.

Ключевые слова: шероховатость; оптимизация.

Введение

В связи с ростом популярности исследований связанных с интегральной фотоникой, в последние годы стали актуальными отдельные аспекты технологии микроэлектроники, ранее не получавшие должного внимания. Так, например, одним из ключевых факторов, влияющих на энергоэффективность радиофотонных интегральных схем, является шероховатость боковых стенок их элементов [1]. Более того, с уменьшением проектных норм проблема шероховатости становится все более актуальной [2]. В общем смысле моделирование шероховатости подразумевает наличие доступа к дорогостоящим САПР, а также значительных вычислительных ресурсов, что серьезно ограничивает круг задач, в которых этот этап можно считать целесообразным. В данной же работе предлагается высокоэффективная имитационная модель шероховатости, в том числе дающая возможность проведения оптимизации параметров шероховатости посредством варьирования параметров техпроцессов.

Оригинальная модель шероховатости

Моделирование шероховатости по оригинальной модели состоит из двух этапов: расчета оптической части фотолитографии — для учета влияния эффекта фотонного шума на формирование неровностей и применения оригинальной имитационной модели резиста. Предполагается, что процесс травления при создании интегральных радиофотонных элементов выбирается высокоанизотропным, что обуславливает наследование шероховатости от резиста к формируемой структуре.

На основе данных о моделировании воздушного изображения (распределения интенсивности по поверхности экспонируемого резиста) производится построение области «негарантированной засветки» [3, 4]. В ней, статистически, может иметь

место недоэкспонирование резиста и, соответственно, будет локализована шероховатость. Вклад эффектов проявления фоторезиста в шероховатость учитывается посредством применения имитационной модели резиста. В базовом приближении полимерную макромолекулу материала резиста можно представить в виде свободно-сочлененной цепи мономеров. Это позволяет не учитывать особенности взаимодействия отдельных атомов при описании пространственных конфигураций полимера. В рамках имитационной модели резиста макромолекулы материала представляются в виде плотно упакованных сфер. Кроме того, в резисте присутствует некоторый разброс по массе (и соответственно, радиусу) молекул, входящих в его состав. При попадании молекулы резиста частично или полностью в область «негарантированной засветки», ее активация происходит с некоторой вероятностью, что вносит вклад в шероховатость итоговой структуры. На рис. 1 изображены исходные данные для оригинальной модели шероховатости (исходная топология, воздушное и резистное изображение), а также пример ее применения.

Анализ модели и оптимизация

Для описанной модели выводится ряд утверждений, позволяющих связать характеристики шероховатости с параметрами фотолитографии и свойствами применяемых в техпроцессе материалов:

- шероховатость минимальна, если проявление резиста находится в месте с максимальным slope воздушного изображения;
- шероховатость минимальна, если выбирается резист, требующий максимального времени экспонирования;
- шероховатость минимальна, если выбирается резист с максимальным разбросом размеров молекул резиста;

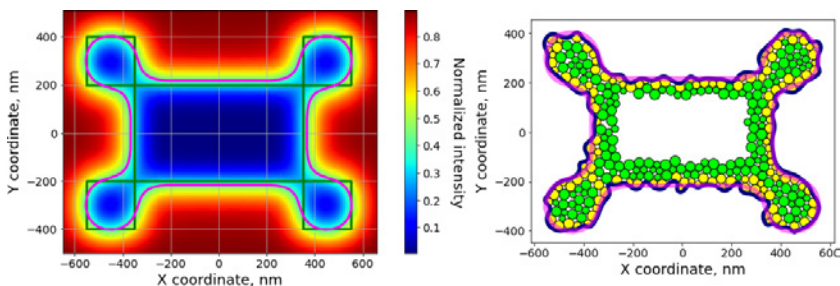


Рис. 1. Исходные данные для оригинальной модели шероховатости (слева) — исходная топология, воздушное и резистное изображение. Пример применения оригинальной модели шероховатости (справа)

В рамках работы на основе первого из приведенных утверждений был построен алгоритм оптимизации шероховатости. В качестве целевой функции использовался суммарный slope воздушного изображения. В качестве средства влияния на slope применялись непечатаемые вспомогательные структуры.

Заключение

Представленная имитационная модель шероховатости может быть применена для оптимизации как собственно шероховатости боковых стенок элементов

интегральных схем, так и их характеристик, связанных с шероховатостью. Хотя результаты оптимизации и показали возможность улучшения параметров шероховатости, однако применение их на практике, требует экспериментальной проверки.

Литература

1. Guiana B., Zadehgol A. Characterizing THz Scattering Loss in Nano-Scale SOI Waveguides Exhibiting Stochastic Surface Roughness with Exponential Autocorrelation, *Electronics*, 11.3 (2022): 307.
2. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002.
3. Sharapov A. A. et al. Grounds and problem statement for software complex for photolithography optimization for minimization of losses in optical structures of photonic integrated circuits, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 939. № 1. IOP Publishing, 2020.
4. Shamin E. S. et al. Sidewall Roughness Model for Optical Losses Calculation in Photonic Integrated Circuits // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки, 2022. — Т. 15. — № S3. — С. 70–75.

УДК 53.06

Исследование эффектов многофиламентарного переключения в ячейках RRAM на основе HfOx и TiOx**Ковешников С. В.¹, Ванькаев А. С.^{1,2}, Клюкина Е. В.^{1,3}, Федотов М. И.^{1,4,5}**

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и обособленных материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru*

² *МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com*

³ *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru*

⁴ *АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1*

⁵ *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
fedotov.mi@phystech.edu*

В работе проведено исследование влияния образующихся в процессе переключения ячейки RRAM многих филаментов на воспроизводимость параметров переключения и плавность процесса переключения из высокоомного в низкоомное состояние. Проведено экспериментальное исследование RRAM на основе HfOx и TiOx.

Ключевые слова: резистивная память; оксид гафния; оксид титана; тонкие диэлектрические слои; плавный Reset; нейроморфные системы.

Резистивная память (ReRAM) обладает рядом ключевых свойств, делающих ее перспективной элементной базой для аналоговых нейроморфных вычислений [1, 2]. В первую очередь это потенциальная многоуровневость, достижимая с помощью контроля напряжения в процессе переключения из низкоомного в высокоомное состояние [3]. Однако ключевой проблемой, связанной с достижением надежных и воспроизводимых резистивных состояний, является нестабильность параметров переключения от цикла к циклу, таких как проводимость в высокоомном состоянии и напряжение переключения. Кроме этого, важен и характер переключения — он может быть как резким, так и плавным даже для одной и той же ячейки памяти. Необходимо ясное понимание физических процессов, происходящих в диэлектрике и на его границах раздела с металлическими электродами, для создания RRAM с надежным многоуровневым переключением.

Нами было проведено детальное экспериментальное исследование мемристорных структур на основе TiOx и HfOx. Особое внимание уделено разбросу сопротивлений в высокоомном состоянии и динамике переключения. На основании разработанной нами модели многофиламентарного переключения проведены теоретические расчеты процессов переключения, результаты которых хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На основе технологий ИПТМ РАН предложен способ создания единственного и строго контролируемого филамента в ячейке RRAM для достижения лучшей воспроизводимости параметров переключения и достижения надежных многоуровневых состояний.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания 075-01304-23-00

Литература

1. Yang J. J., Strukov D. B. and Stewart D. R. Memristive devices for computing // Nat. Nanotechnol., 2012. Vol. 8. № 1. P. 13–24.
2. Moon K. et al. RRAM-based synapse devices for neuromorphic systems // Faraday Discussions, 2019. Vol. 213. P. 421–451. DOI: 10.1039/C8FD00127H.
3. Fedotov M. I., Korotitsky V. I. and Koveshnikov S. V. Experimental and Theoretical Study of Intrinsic Variability in Hafnium Oxide Based RRAM // 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021. P. 26–32. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507665.

УДК 538.91

Особенности существующих компактных SPICE-моделей и критерии их достоверности

Кириллова А. В., Потупчик А. Г.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Рассмотрены опубликованные SPICE-модели всех существующих активных и пассивных схемотехнических элементов. Разработаны критерии достоверности для компактных моделей устройств полупроводниковой промышленности на основе имеющиеся критериев качества. Конкретизированы и расширены требования к компактным моделям, а также пересмотрены ее качественные и количественные оценки.

Ключевые слова: компактные модели; SPICE-модель; моделирование; точность; достоверность; диапазон применимости; поведение модели; стандартизация.

Введение

При проектировании сверхбольших интегральных схем на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП СБИС) [1] используется функционально-логическое, схемотехническое и приборно-технологическое моделирование. На протяжении последних трех десятилетий возможности моделирования постоянно отставали от темпов развития технологии [2]. Продолжаются глобальные усилия по разработке точных и эффективных компактных моделей для схемотехнического моделирования, чтобы сохранить паритет с непрерывным уменьшением масштаба МОП-транзисторов [3]. Новый темп развития накладывает новые требования на разработчика моделей со стороны проектировщиков ИС, технологов и производства. Требуется заново производить классификацию моделей, расширить и конкретизировать требования к компактным моделям.

Глобально SPICE-модель можно разделить на модель устройства и модель с подсхемой (рис. 1). Модели устройств представляют собой модели таких элементов, как диоды, резисторы, емкости, биполярные и полевые транзисторы и т.д. Модели подсхем представляют собой комбинации моделей устройств, и их можно рассматривать как модели состояния схемы. Такой подход используется для силовых и аналоговых компонент. Кроме того, существуют также модели специального назначения, используемые для выполнения тепловых и радиационных расчетов цепей [4].

Ключевые требования к компактным моделям характеризуются детальным описанием физических процессов в приборе, учетом большинства физических эффектов, минимальным числом эмпирических коэффициентов, строгой структуризацией модели и процедуры ее синтеза с возможностью дальнейшей модификации [3]. Современные компактные модели отличаются детальным описанием области умеренной инверсии и точным моделированием производных вплоть до третьего порядка, чем не могут похвастаться модели первого поколения [2]. Предложенные в работе требования включают в себя пункты, связанные с особенностями выбранной технологии производства, вычислительными свойствами, процедурой экстракции, процедурой измерений, а также дальнейшей применимостью при проектировании ИС. Предложенный в работе алгоритм поможет произвести выбор подходящей SPICE-модели относительно предъявляемых требований.

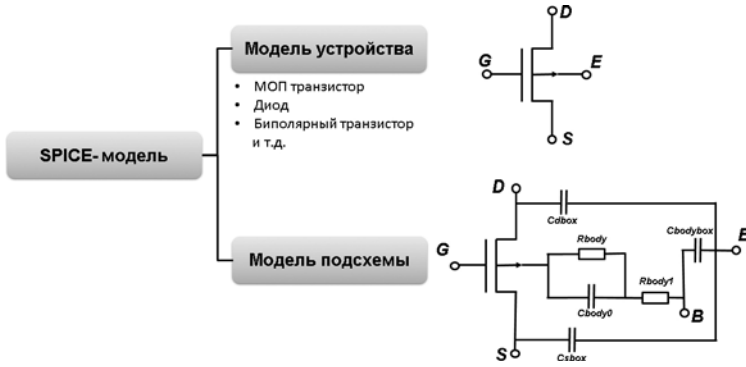


Рис. 1. Разновидности SPICE-моделей

Степень соответствия между моделью и объектом исследования можно определить точностью, достоверностью, диапазоном применимости, а также качественной и количественной оценкой. Чтобы сравнить компактные модели и их возможности коалиция по стандартизации компактных моделей (СМС) [5] разработала набор тестов, где параметры, которые можно настроить для правильного моделирования, определяют количественную способность компактной модели, а поведение уравнений модели определяют качественное поведение модели.

Заключение

Благодаря тестам можно технически сравнить модель с результатами измерений, однако в тестах не упоминается требуемый процент ошибок. Единая мера качества SPICE-модели смогла бы упростить взаимосвязь между разработчиками компактной модели и ее пользователями. Простой взгляд на общую среднеквадратичную ошибку не гарантирует, что данный набор параметров действительно правильно характеризует полученный результат [1]. Для полной картины прогнозирования точности и достоверности модели необходимо использовать статистические методы, такие как графический анализ, коэффициент корреляции и детерминации, средняя абсолютная процентная ошибка.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. — М.: Фазматлит, 2010. — С. 112–245.
3. Brooks B., Green K., Krick J., Vrotsos T., Weise D. Standardization and Validation of Compact Models // Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, 2002. Vol. 1. P. 653–656.
4. Saha S. K. Compact Models for Integrated Circuit Design Conventional Transistors and Beyond // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
5. Compact Model Council (CMC) Homepage: <https://si2.org/standard-models>.

УДК 621.382

Эффект локального рассогласования в SPICE-модели транзистора**Кривенцев А. М., Осыкин А. А., Нуштаев А. В.**

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

akriventsev@niime.ru, aosykin@niime.ru, anushtaev@niime.ru

В работе изучено влияние эффекта локально рассогласования на МОП-транзисторы, изготовленные по технологии КНИ 180 нм, сгенерирована статистическая модель для его учета.

Ключевые слова: SPICE-модели; моделирование; mismatch; локальное рассогласование.

Введение

Освоение современных субмикронных норм проектирования приводит к тому, что размеры приборов уменьшаются быстрее, чем технологические допуски на эти размеры. Увеличению стоимости выполняемых проектов сопутствует снижение процента выхода годных кристаллов. Высококачественное моделирование не просто обеспечивает доведение схемы до функционирования, а обуславливает принципиальную возможность их создания [1]. Поэтому, при разработке ИС широкое применение находят математические модели, которые должны не просто воспроизводить электрофизическое поведение прибора, но и учитывать возможный статистический разброс значений параметров.

Статистический разброс

Причинами разброса ВАХ могут являться неточности на операциях формирования изображения на пластине, наличие локальных дефектных областей, градиент механических напряжений и т. п.

Глобальный разброс учитывает рассеивание электрических параметров изделий, произведенных на различных фабриках, реализующих одинаковую технологию, а также между партиями, между пластинами, а также кристаллами в пределах одной пластины, произведенных на одном предприятии.

Локальный разброс обычно значительно проявляется себя, чем глобальный, и часто вызван особенностями топологии и топографии кристалла. Базовой зависимостью, описывающей эффект локального рассогласования, параметров 2-х идентичных близкорасположенных транзисторов, является закон Пелгрона [2], который сводится к тому, что дисперсия разности параметров ΔP двух одинаковых МОП-транзисторов зависит от расстояния между ними D и обратно пропорциональна их площади $W \cdot L$ по закону:

$$\sigma^2(\Delta P) = \frac{A_p^2}{W \cdot L} + S_p^2 \cdot D^2,$$

Современные модели — сложносоставные. Базовым функционалом является ядро модели. В нем производится расчет всех основных характеристик прибора. С уменьшением технологических норм, ядро модели начинает «обрастать» дополнительными эффектами, которые зависят от сложности технологии и конструкции.

Хорошая модель должна учитывать технологические особенности производства транзисторов, особенности расположения транзисторов относительно друг друга, расположение других приборов рядом с транзистором, паразитные составляющие, эффекты связанные с особенностями подложки (например КНИ), и многие другие. Отдельным пунктом можно отметить статистическое моделирование, которое включает в себя разные виды разброса.

Учет рассогласования в модели

Для обеспечения разработчиков SPICE-моделями с возможностью учета эффекта локального рассогласования была поставлена цель разработать статистическую модель транзистора для технологии КНИ «180 нм».

Для реализации были поставлены следующие задачи:

1. Разработать ТЗ для создания тестовых структур с номиналами необходимых геометрий.
2. Разработать топологию тестового кристалла для производства тестовых структур.
3. Из результатов измерения тестовых структур сгенерировать статистическую модель.
4. Верифицировать результат.

В результате проделанной работы было разработано описание и топология тестовых структур, техническое задание на измерение тестового кристалла. Обработанные результаты измерений и сгенерирована статистическая модель. Результат генерации для тока насыщения приведен на рис. 1 и 2.

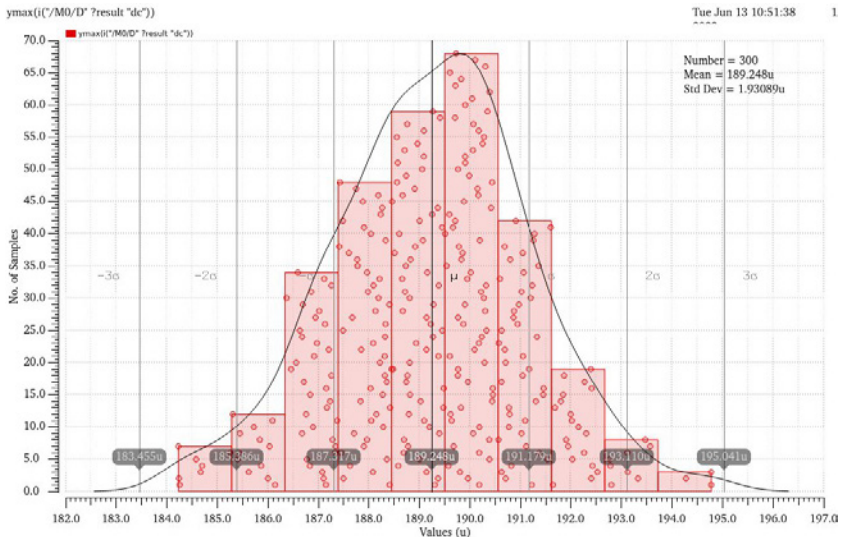


Рис. 1. Распределение тока насыщения для КНИ 180 nmos транзистора

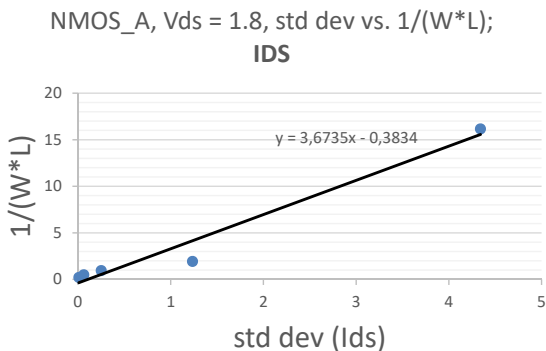


Рис. 2. Значение стандартного отклонения для КНИ 180 nmos транзистора

Литература

1. Шелепин Н.А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника, 2004. — № 9. — С. 30–35.
2. IEEE recommended practices #P1485 on: Test procedures for microelectronic MOS-FET circuit simulator model validation/ Working Draft — completed 05/21/97.
3. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и наноэлектронике. — М.: Фазматлит, 2010.

УДК 621.3.049.77

Оценка и моделирование основных физических параметров КМОП сенсора

Малич Д. С., Ключников А. С., Селецкий В. К.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

dmalich@niime.ru

В работе рассмотрено моделирование физических процессов, происходящих внутри КМОП сенсоров. Численное моделирование области переноса заряда предсказывает качество работы сенсора и позволяет провести оценку его приборных параметров.

Ключевые слова: КМОП сенсор; пиксель; численное моделирование; фотодиод.

Введение

КМОП сенсоры являются ключевым элементом фотоматриц. Они широко используются как для массового рынка, так и научных и военных применений. Эффективность фотоматриц напрямую зависит от параметров КМОП сенсора: теневого тока, СТЕ, чувствительности, квантовой эффективности и FWC [1]. На сегодняшний день самым распространенным видом КМОП сенсора является 4Т ячейка с дополнительным р+ слоем. Для подобной конфигурации ключевым местом является соединение фотодиода (PPD) и затвора переноса (TG) [2]. Численное моделирование переноса заряда из фотодиода в область чувствительного узла позволяет определить оптимальный технологический маршрут и прогнозировать параметры КМОП сенсора для их дальнейшей корректировки.

Численное моделирование переноса заряда

Для 4Т КМОП сенсоров ключевым местом, определяющим работоспособность прибора, является область затвора переноса (рис. 1). При подаче на затвор (TG) положительного потенциала заряд, накопленный в p области фотодиода начинает перетекать в чувствительный узел (SN). Эффективность переноса определяется наличием или отсутствием потенциальных барьеров или ям на границе PPD-TG и оценивается параметром:

$$CTE = \frac{Q_{out}}{Q_{PPD}},$$

где выходной заряд (Q_{out}) нормирован на заряд в фотодиоде до переноса (Q_{PPD}). Наличие неровностей потенциального профиля приводит к возникновению бликов при обработке изображения. Максимальный заряд, который способен вместить в себя фотодиод, контролируется параметром FWC:

$$FWC = \int_{V_{FW}}^{V_{min}} C_{PPD} dV_{PPD},$$

где интегрирование ведется от минимального потенциала (при котором электроны начнут перетекать из фотодиода) до максимального (полного обеднения фотодиода). FWC вместе с уровнем шума определяют динамический диапазон работы

КМОП сенсора. Дополнительным источником электронов, содержащихся в потенциальной яме фотодиода является теневой ток. Диффузионные процессы и перезарядка поверхностных состояний на границе кремний/оксид приводит к нежелательной зарядке в области фотодиода. В случае 4Т пикселя эти поверхностные состояния находятся на оксидной границе затвора переноса. Значения теневого тока напрямую зависит от потенциального профиля барьера между чувствительным узлом и фотодиодом [3]. Фоточувствительность прибора определяется его квантовой эффективностью — вероятностью рождения электронно-дырочной пары.

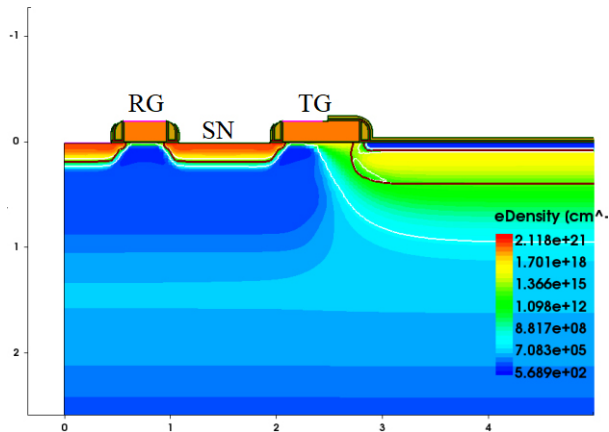


Рис. 1. Электронный профиль области переноса пикселя

При разработке КМОП сенсора необходимо оптимизировать все вышеописанные параметры. Для этого подбирается соответственный технологический маршрут с оптимальными параметрами имплантации и геометрии конструкции фотодиода и затвора переноса. Численное моделирование, основанное на самосогласованном решении уравнения Пуассона и уравнения дрейфа-диффузии, позволяет прогнозировать процессы переноса заряда [4] и эффективность работы КМОП сенсора. Подобное моделирование позволяет оценить его приборные параметры, которые достаточно сложно измерить прямым способом.

Заключение

Численное моделирование области переноса заряда и фотодиода является необходимым шагом при проектировании КМОП сенсора позволяющим заблаговременно оценить приборные параметры образца и, в случае необходимости, провести корректировку технологического маршрута.

Литература

1. Stefanov K. D. and Prest M. J. Pinned Photodiode Imaging Pixel With Floating Gate Readout and Dual Gain // IEEE Transactions on Electron Devices, 2023. Vol. 70. № 6. P. 3136–3139. DOI: 10.1109/TED.2023.3266711.

2. Capoccia R., Boukhaïma A., Jazaeri F. and Enz C. Compact Modeling of Charge Transfer in Pinned Photodiodes for CMOS Image Sensors // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 66. № 1. P. 160-168, Jan. 2019. DOI: 10.1109/TED.2018.2875946.
3. Marcelot O., Goiffon V., Rizzolo S., Pace F., Magnan P. Dark current sharing and cancellation mechanisms in CMOS image sensors analyzed by TCAD simulations // IEEE Trans. Electron Devices 64 (12) (2017) 4985–4991.
4. Marcelot O., Goiffon V., Nallet F. and Magnan P. Pinned Photodiode CMOS Image Sensor TCAD Simulation: In-Depth Analysis of in-Pixel Pinning Voltage Measurement for a Diagnostic Tool // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 64. № 2. P. 455-462, Feb. 2017. DOI: 10.1109/TED.2016.2634601.

УДК 004.94

Поведенческая видеоимпульсная модель маломушящего усилителя с учетом его нелинейных свойств в области нижних частот

Байкалова А. Е.^{1,2} Семенов Э. В.^{1,2}*¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники**634050, г. Томск, просп. Ленина, 40**² Институт сильноточной электроники СО РАН**634055, г. Томск, Академический просп., 2/3**annabajkalova2016@gmail.com, edwardsemyonov@narod.ru*

Приведено описание метода анализа нелинейных и инерционных свойств маломушящего усилителя в области нижних частот. Метод включает построение модели устройства на основе схемы нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка. Модель с хорошей точностью описывает разные части переходных характеристик маломушящего усилителя в видеоимпульсном режиме.

Ключевые слова: видеоимпульсная модель; маломушящий усилитель; нелинейные свойства; инерционность; нелинейный рекурсивный фильтр.

Введение

В настоящее время много работ посвящено созданию поведенческих моделей, описывающих нелинейные и инерционные свойства объектов на уровне структурных схем. Однако в большинстве исследуются искажения узкополосных гармонических сигналов [1]. Для видеоимпульсного режима существующие модели структурно сложны и неудобны для инженерного применения. Так, при исследовании откликов объектов, способных к нелинейному преобразованию зондирующих видеоимпульсных сигналов, большой проблемой оказалось отсутствие модели, описывающей нелинейность и инерционность маломушящего усилителя, входящего в конструкцию приемного тракта системы, в области нижних частот [2–3], а также подавление вносимых этим усилителем искажений в характеристику нелинейности. Для этого случая актуальна разработка соответствующей поведенческой модели маломушящего усилителя с использованием нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка.

Структурная схема модели маломушящего усилителя

В соответствии с предлагаемой структурной схемой (рис. 1а), переходные характеристики маломушящего усилителя в видеоимпульсном режиме могут быть описаны моделью нелинейного рекурсивного фильтра верхних частот. Такая модель способна разделить разные источники нелинейности в объекте. Таким образом, появляется возможность описания спада переходного процесса в области больших времен, характерного для выбранного МШУ. На рис. 1б изображены два семейства переходных характеристик: реальное и в результате моделирования. Осуществляется расчет выходного напряжения по заданному сигналу входного тока.

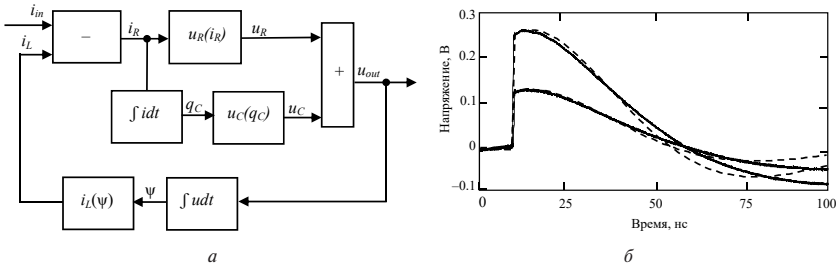


Рис. 1. Структурная схема нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка (а) и семейство переходных характеристик (б): реальные (сплошные кривые) и в результате моделирования (пунктирные кривые)

Сформулированы следующие выражения для расчета фильтра [4]:

$$\begin{aligned}
 i_R &= i_{in} - i_L, \\
 u_R &= i_R \cdot R, \\
 q_C &= \int i dt, \\
 u_C &= q_C / C, \\
 \psi &= \int u_{out} dt, \\
 i_L &= \psi / L,
 \end{aligned}$$

где i_R — ток резистора, i_{in} — входной ток, i_L — ток индуктивности, R — значение сопротивления, u_R — напряжение на резисторе, L — значение индуктивности, ψ — магнитный поток.

Заключение

Созданная модель нелинейного рекурсивного фильтра второго порядка показывает удовлетворительное соответствие переходных характеристик фильтра с экспериментально полученными характеристиками маломощного усилителя. Модель может быть применена в задачах моделирования широкополосных систем связи и зондирования для правильного учета динамического диапазона и нелинейных искажений маломощного усилителя.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0015)

Литература

1. Martins J. P., Carvalho N. B., Pedro J. C. Intermodulation distortion of third-order nonlinear systems with memory under multisine excitations // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2007. Vol. 55. № 6. P. 1264–1271. DOI: 10.1109/TMTT.2007.896794

2. Байкалова А. Е., Семенов Э. В. Увеличение динамического диапазона приемной системы нелинейного видеоимпульсного локатора. — Прикладные аспекты СВЧ-техники: матер. 32-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь: СевГУ, 2022. — Вып. 4. — С. 241–242.
3. Семенов Э. В., Малютин Н. Д., Лошилов А. Г. Программно-аппаратный комплекс для исследования нелинейности преобразования видеоимпульсных сигналов сверхширокополосными приемниками. — Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС: матер. II науч.-техн. конф. «Центральное конструкторское бюро автоматики». — Омск, 2008. — С. 174–177.
4. Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021. Vol. 68. № 6. P. 2192–2196.

УДК 621.382.3

Применения методов машинного обучения для моделирования МОП-транзисторов

Жаров Е. Е., Попов Д. А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
da.popov@hse.ru

В работе рассматривается возможность применения методов машинного обучения для моделирования вольт-амперных характеристик МОП-транзистора. Приведено обоснование замены приборно-технологического моделирования на модели полупроводниковых компонентов на базе нейронных сетей (ML-TCAD). Для иллюстрации подхода разработана модель для 130 нм МОП-транзистора и проведен расчет входных вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Ключевые слова: цифровой двойник; МОП-транзистор; машинное обучение.

Введение

В настоящее время, приборно-технологическое моделирование (TCAD) широко используется как на отечественных и зарубежных полупроводниковых предприятиях для разработки полупроводниковых компонентов, так и в исследовательских целях различных компаний. Такие САПРы как Synopsys Sentaurus TCAD, Silvaco TCAD, Cogenda и др. используют для расчета физических процессов протекающих в полупроводниковых структурах огромное количество математических выражений описывающие эти процессы, что позволяет достаточно достоверно получать характеристики электронных компонентов близких к реальным экспериментам. Однако, несмотря на несомненное преимущество такого подхода он обладает существенным недостатком в части больших временных затрат на расчет характеристик (вплоть до десятков часов), особенно с учетом воздействия спецфакторов.

С другой стороны нейронные сети уже несколько десятилетий используются для решения задач в самых разных сферах, том числе и в полупроводниковой промышленности для задач исследования полупроводниковых материалов и производства полупроводников [1]. Предлагается рассмотреть возможность применения методов машинного обучения для моделирования вольт-амперных характеристик электронных компонентов.

Разработка ML модели МОП-транзистора на базе нейронных сетей

Разработка ML модели рассмотрена для задачи расчета ВАХ МОП-транзистора с длиной канала 130 нм и различной шириной канала. Процесс разработки модели можно разделяется на три основных этапа:

1. Подготовка обработанного и структурированного массива данных (dataset).
2. Обучение архитектуры
3. Тестирование.

В качестве входных данных для нейронной сети подавались параметры структуры (длина и ширина канала), значения напряжения и режим измерения. На выходе — значения тока. Данные были получены из результатов TCAD моделирования десяти ветвей ВАХ, расчет одной ветви занимал порядка 10 минут на компьютере

с процессором Intel i7 (3,4 ГГц, 32 Гбайт ОЗУ). Подготовка массива данных является ключевым и наиболее важным этапом разработки ML-TCAD модели, который напрямую влияет на точность полученных характеристик.

В рамках разработки архитектуры нейронной сети было рассмотрено несколько моделей от пары слоев до нескольких десятков, а также сверточные, рекуррентные и полносвязные виды слоев, и рассмотрены функции оптимизации. Ошибка полученной модели представлена на рис. 1.

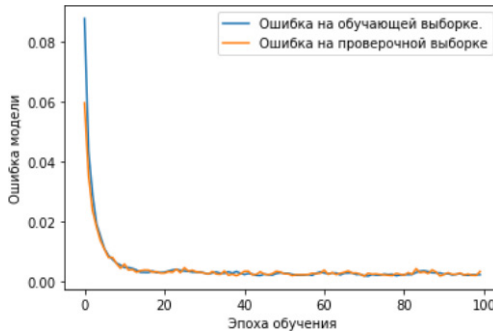


Рис. 1. Процесс обучения основной модели нейронной сети

Результат работы обученной нейронной сети представлен на рис. 2. В Synopsys Sentaurus TCAD было проведено моделирование ветви ВАХ 130 нм МОП-транзистора с шириной канала 3 мкм и это же значение ширины канала было подано на вход обученной нейронной сети. Из графика видно, что значения токов полученных с помощью ML-TCAD модели с высокой точностью совпадает со значениями полученные с помощью TCAD моделирования.

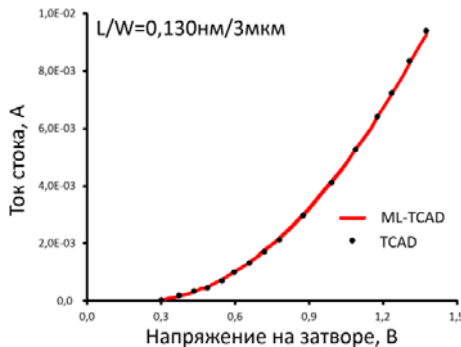


Рис. 2. Результат, полученный с помощью TCAD моделирования (точки) и нейронной сетью (линия)

Отдельно стоит отметить, что компьютерное время счета нейронной сети составляло считанные секунды, в отличие от 10 минут счета с помощью TCAD.

Конечно, необходимо учитывать и время на создание обучающего датасета, сложность которого зависит от поставленной задачи, но такая процедура выполняется разово в рамках поставленной задачи.

Заключение

Продемонстрирован подход к получению ВАХ МОП-транзисторов с использованием методов машинного обучения. Такой подход позволяет проводить вычисления значительно быстрее по сравнению со стандартным приборно-технологическим моделированием. Однако необходимо уделять особое внимание подготовке обучающего массива данных.

Исследование выполнено в рамках стратегического проекта НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность», за счет средств гранта в форме субсидии на реализацию Программы «Приоритет-2030»

Литература

1. Liu D.-Y., Xu L.-M., Lin X.-M., Wei X., Yu W.-J., Wang Y., Wei Z.-M. Machine learning for semiconductors // Chip, 2022. Vol. 1. Issue 4. 100033. P. 1–16.

УДК 51-74:621.396.67

Об особенностях моделирования печатных антенн методом моментов**Торопов В. В.***Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
vladimirtoropov516@gmail.com*

Исследованы сложности построения расчетных сеток, возникающие при моделировании микрополосковых печатных антенн методом моментов. Рассмотрены варианты исполнения расчетной сетки с использованием Gmesh, GNUOctave и AntennaToolbox.

Ключевые слова: расчетная сетка; метод моментов; печатная антенна; питающая пластина.

Антенны печатного исполнения являются актуальными компонентами беспроводных коммуникационных систем и широко применяются во многих отраслях. Их экономическая выгода, компактность, разнообразие форм, высокая производительность и широкий спектр применений делают их незаменимыми для современных технологий. Эффективное проектирование печатных антенн требует тщательного моделирования и анализа их характеристик излучения. Перед началом моделирования необходимо выбрать способ подачи питания в модель антенны. В связи со сложностью создания точной копии питающего элемента антенны при компьютерном моделировании, прибегают к замене коаксиальных кабелей на прямоугольные питающие элементы в виде пластин, с нанесенной на них расчетной сеткой. Трудность построения расчетной сетки связана с необходимостью сшивания элементов сетки на границах питающей пластины, поверхности антенны и заземления, что приводит к утаиванию элементов сетки в местах соединения. При этом изменения длин ребер треугольных элементов сетки оказывает существенное влияние на результат моделирования.

Для исследования выбрана тонкая печатная антенна прямоугольной формы, расположенная в 2,6 мм над поверхностью тонкой металлической пластины заземления. Пространство между печатной антенной и пластиной заземления заполняется воздушной средой с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 1$. Геометрические размеры (длина, ширина) металлической пластины в два раза превышали геометрические размеры антенны. Питание антенны осуществлялось с помощью тонкой прямоугольной металлической пластины, перпендикулярно расположенной между антенной и пластиной заземления. В ходе работы изменялись размеры питающей пластины, ее расположение, а также угол поворота пластины вокруг вертикальной оси, перпендикулярной печатной антенне. Моделирование характеристик излучения выполнялось методом моментов на основе решения интегрального уравнения электромагнитного поля с использованием базисных RWG функций, определенных для каждой пары треугольников расчетной сетки [1]. Построение разных вариаций расчетных сеток осуществлялось при помощи программ Gmesh [2] и AntennaToolbox [3], а также выполнялось

вручную в GNUOctave [4]. Верификация полученных результатов выполнялась в OpenEMS [5] методом конечных разностей во временной области (МКРВО).

В результате найден максимальный размер ребра элементов расчетной сетки, ограниченный вычислительной мощностью компьютера, показывающий высокую сходимость с результатами, полученными МКРВО: относительное отклонение диаграммы направленности в направлении максимума излучения 4% для Gmsh, 3,8% для AntennaToolbox и 7,9% при построении сетки вручную. Выявлены недостатки по каждому из используемых вариантов построения расчетной сетки. Так, расчетная сетка, построенная вручную, не дает возможности изменять размеры и положение питающей пластины, а также дает худшую сходимость с МКРВО. Gmsh позволяет использовать любые размеры и положения питающей пластины, но при этом сильно видоизменяет расчетную сетку, что приводит к изменениям результатов моделирования. AntennaToolbox показывает лучшую сходимость с МКРВО, но не имеет пользовательского интерфейса, позволяющего редактировать расчетную сетку.

Литература

1. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1982. Vol. 30. № 3. P. 409–418.
2. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator [Электронный ресурс]. — URL: <http://gmsh.info>, свободный (дата обращения: 12.07.2023).
3. AntennaToolbox — MATLAB [Электронный ресурс] — URL: <https://www.mathworks.com/products/antenna.html>, свободный (дата обращения: 12.07.2023).
4. GNU Octave [Электронный ресурс]. — URL: <https://octave.org>, свободный (дата обращения: 12.07.2023).
5. OpenEMS is a free and open electromagnetic field solver using the FDTD method [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.openems.de>, свободный (дата обращения: 12.07.2023).

УДК 004.94

Универсальное средство моделирования широкополосных радиотехнических систем на уровне структурной схемы**Полторыхин К. М., Семенов Э. В., Березин А. Е., Байкалова А. Е.***Томский государственный университет систем управления**и радиоэлектроники**634050, г. Томск, просп. Ленина, 40**kpoltorykhin@inbox.ru*

В работе приведено описание средства автоматизированного проектирования с использованием predeterminedной схемы для радиотехнических и радиолокационных систем и поведенческих нелинейно-инерционных моделей для работы в режиме широкополосного и импульсного воздействия.

Ключевые слова: поведенческое моделирование; САПР; нелинейно-инерционные модели; видеоимпульсный режим; радиотехническая система; нелинейная радиолокация.

Введение

Сейчас доступ к импортному программному обеспечению существенно ограничен, что представляет реальную угрозу национальной промышленности в области радиотехники, радио- и микроэлектроники. На российском рынке представлены средства автоматизированного проектирования (САПР) разного уровня: технологические, которые направлены на проектирование топологий интегральных микросхем с целью их дальнейшего производства, САПР схемотехнического уровня, для проектирования электрических схем. Эти САПР в нашей стране активно развиваются, однако в тех областях радиоэлектроники, где создаются инновационные разработки с большим научным потенциалом, проектирование в целом начинается с уровня структурных схем с использованием моделей типа «черный ящик», описывающих их поведение в результате воздействия различных сложных видов сигналов.

В настоящее время становятся актуальны системы, работающие в широкой полосе частот. Одно из направлений, где необходимо моделирование процессов распространения широкополосных и сверхширокополосных сигналов является направление нелинейной видеоимпульсной локации. Моделирование радиолокационной системы при видеоимпульсном воздействии является необходимой задачей для оценки дальности зондирования и получаемого отклика на тестовые сигналы. Вторым направлением применения системы моделирования является развитие широкополосных систем связи бортовых космических аппаратов. Учет влияния помех на распространение сверхширокополосного сигнала является важной задачей при проектировании систем связи и управления. Для этого необходимо в первом приближении использовать поведенческое моделирование.

Средство автоматизированного проектирования BehSimLab

Разработанная система автоматизированного проектирования BehSimLab используется для поведенческого моделирования и имеет predeterminedную схему. Это накладывает ограничение, которое решается с помощью минимального количества необходимых узлов, в которых наиболее проявляются нелинейно-инерционные



свойства. За счет переключения узлов из состояния включен/выключен можно переключаться в режим моделирования системы связи или радиолокационной системы. Система состоит из передающей части (генератор, преобразователь частоты, усилитель мощности и передающая антенна), канала распространения, куда также входит объект зондирования, приемной части (приемная антенна, малошумящий усилитель, преобразователь частоты и аналого-цифровой преобразователь). Для каждого узла составлена система параметров, необходимых для задания характеристик распространения сигнала в узлах.

Для каждого критического узла системы используются собственные разработанные модели, которые работают при видеоимпульсном воздействии. Отличительной особенностью является применение поведенческих моделей, представленных в виде нелинейных рекурсивных фильтров [1]. Данная модель позволяет корректно описывать нелинейную реакцию системы как на текущее значение сигнала, так и на нелинейные взаимодействия прошлых значений сигналов, на которые система реагирует по инерции. Так для малошумящего усилителя применяется модель рекурсивного фильтра второго порядка, которая описывает нелинейность и инерционность усилителя в области низких частот.

Заключение

Разработанная система автоматизированного проектирования BehSimLab позволяет проводить моделирование радиотехнических и радиолокационных систем на уровне структурной схемы. Собственные разработки поведенческих моделей позволяют проводить моделирование в видеоимпульсном режиме и были реализованы в САПР.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00605

Литература

1. Semyonov E. V. Simple Behavioral Model of baseband pulse devices in the form of a second-order nonlinear recursive filter // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021. Vol. 68. № 6. P. 2192–2196.

УДК 776.19

Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением

Литаврин М. В.¹, Шараров А. А.^{1,2}, Шишляников А. В.¹, Горнев Е. С.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
example@gmail.com² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработка и оптимизация композиций фоторезистов требует экстракции параметров резиста с последующим моделированием процесса фотолитографии. В работе проводилась экстракция параметров фоторезиста ФР193–146 с помощью экспонирования на открытом кадре. Получены значения параметров C_{eff} , E_{th} , k_{amp} исследуемого фоторезиста. Получено нулевое значение k_{loss} , что указывает на его диффузионную природу и на необходимость определения этого параметра иным методом.

Ключевые слова: моделирование фотолитографии; экстракция эмпирических параметров; ФХУ; литография глубокого ультрафиолета.

Введение

В настоящий момент активно ведутся работы по импортозамещению материалов для микроэлектроники, в том числе, фоторезистов. Для разработки оптимальных композиций фоторезистов требуется более глубокое понимание их поведения в процессе фотолитографии, чем может дать анализ матриц фокус-доза [1]. В данной работе проводилась экстракция параметров реакций в резисте, проходящих при постэкспозиционной сушке (post-exposure bake, РЕВ), для фоторезиста ФР193–146 — это экспериментальная композиция фоторезиста с химическим усилением (CAR-резиста) для длины волны 193 нм.

Теория и эксперимент

В процессе экспонирования резиста из фотогенератора (РАG) выделяется молекула кислоты. В современные CAR-резисты для контроля диффузии кислоты добавляют основания (~20% от концентрации РАG), поэтому при малых дозах экспонирования вся образованная кислота гасится основаниями (эта реакция происходит очень быстро). При больших дозах все основания в экспонированной области нейтрализуются. Поэтому зависимость концентрации кислоты в пленке резиста от дозы экспонирования можно записать следующим образом:

$$\text{при } E \leq E_{\text{th}}: \quad H_0 = 0$$

$$\text{при } E > E_{\text{th}}: \quad H_0 = G_0 \exp(-C_{\text{eff}} E_{\text{th}}) (1 - \exp(-C_{\text{eff}} \cdot (E - E_{\text{th}}))) \quad (1)$$

где E — доза экспонирования, E_{th} — доза, при которой все основания нейтрализуются, H_0 — концентрация кислоты после экспонирования резиста, G_0 — концентрация

РАГ до начала экспонирования, C_{eff} — эффективная константа экспонирования (квантовый выход генерации кислоты).

Если не принимать во внимание диффузию кислоты, то при дальнейшей в резисте происходят следующие процессы. Во-первых, образовавшаяся в процессе экспонирования кислота вызывает каталитическую реакцию деблокирования полимера резиста. Во-вторых, эффективная концентрация кислоты с течением времени уменьшается, что можно рассматривать как некую реакцию потери кислоты. Принято считать, что обе эти реакции имеют первый порядок по концентрации кислоты.

В результате мы получаем следующее уравнение для степени деблокирования резиста x (т.е. доля деблокированных групп в полимере резиста) [2]:

$$x = 1 - \exp\left(-\frac{k_{amp}H_0}{k_{loss}}[1 - \exp(-k_{loss}t_{PEB})]\right), \quad (2)$$

где k_{amp} — константа реакции усиления, k_{loss} — константа реакции потери кислоты, t_{PEB} — время РЕВ.

Для оценки параметров C_{eff} , E_{th} , k_{amp} и k_{loss} исследовалась зависимость степени деблокирования резиста от температуры и времени РЕВ, а также от дозы экспонирования. Для этого проводилось экспонирование резиста на открытом кадре (т.е. без рисунка) с проходом по дозе с последующим процессом сушки при определенной температуре (95–105 °С) и длительности (75–120 с) (эксперимент проводился на оборудовании АО «Микрон»). Степень деблокирования фоторезиста оценивалась через изменение его толщины в процессе РЕВ (потеря толщины резиста прямо пропорциональна его степени деблокирования [3]). При выбранных экспериментальных условиях горизонтальной диффузией кислоты в резисте можно пренебречь ввиду отсутствия выраженного градиента концентрации. Вертикальная диффузия кислоты в резисте сглаживает эффекты стоячих волн и небольшого градиента концентрации, вызванного затуханием в пленке экспонирующего излучения.

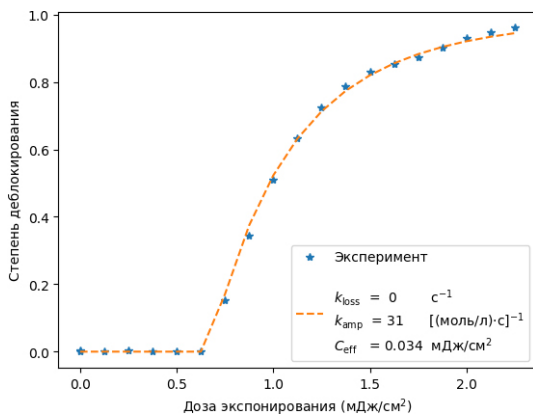


Рис. 1. Зависимость степени деблокирования от дозы экспонирования при $T_{PEB} = 95^\circ\text{C}$ и $t_{PEB} = 75\text{ с}$

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены результаты фита ур. 2 к экспериментальным данным для $T_{PEB} = 95^\circ\text{C}$ и $t_{PEB} = 75$ с. Значение параметра C_{eff} рассчитано на основании значения E_{th} и данных о составе фоторезиста (концентраций PAG и оснований). Значения k_{amp} и k_{loss} получены с помощью стандартной регрессии наименьших квадратов при фиксированных C_{eff} и E_{th} .

Интересным результатом является полученное значение $k_{loss} = 0$. Это указывает на то, что потеря кислоты не является химической реакцией, а имеет диффузионную природу [4] и не может быть адекватно определена в эксперименте с экспонированием без рисунка.

Выводы

Эксперименты по экспонированию на открытом кадре с проходом по дозе и разными режимами РЕВ позволяют определить такие параметры фоторезиста, как C_{eff} , E_{th} , k_{amp} (при условии известного отношения концентраций PAG и оснований в композиции резиста). Параметр k_{loss} может иметь диффузионную природу, поэтому его оценку нужно проводить из иных соображений.

Литература

1. Балан Н. Н. и др. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии // Известия высших учебных заведений, Материалы электронной техники, 2019. — 22 (4). — С. 279–289. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-4-279-289>.
2. Petersen J. S. et al. Characterization and modeling of a positive-acting chemically amplified resist // Proc. SPIE 2438, Advances in Resist Technology and Processing XII, (9 June 1995). <https://doi.org/10.1117/12.210377>.
3. Jakatdar N. H. et al. Characterization of a positive chemically amplified photoresist for process control // Proc. SPIE 3332, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XII, (8 June 1998). <https://doi.org/10.1117/12.308771>.
4. Croffie E. Moving Boundary Models and Methods for Deep Submicron Resist Process Simulation // EECS Department, University of California, Berkeley, May 1999. Chapter 3.

УДК 51-74

Разработка правил расстановки SRAF на основе модели порога проявления с учетом изменения режимов экспонирования

Харченко Е. Л.¹, Московцев А. Ф.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

ekharchenko@niime.ru, moskovtsev.af@phystech.edu

В работе проведено измерение вспомогательных структур при различных режимах экспонирования. Полученные РЭМ-снимки отсортированы методами машинного обучения. Далее подобран порог проработки вспомогательных структур, на основе которого определены правила их расстановки.

Ключевые слова: вычислительная литография; разрешающая способность фотолитографии; вспомогательные структуры; РЭМ.

Введение

Применение техник повышения разрешающей способности значительно увеличивает окно процесса критических элементов дизайна, что приводит к повышению выхода годных [1]. Техника, рассматриваемая в работе, заключается в применении вспомогательных непечатаемых структур (SRAF — subresolution assist features) [2–3]. Размер этих структур, как правило, недостаточен для проявления в резисте, однако, SRAF оказывают дифракционное влияние на проработку соседних структур. При грамотном подборе параметров SRAF возможно расширить окно процесса критических структур в области допустимых значений фокуса.

Эксперимент

В работе рассмотрен затворный слой проектной нормы 28 нм. Проведены измерения тестовых структур типа периодических линий со SRAF при номинальных условиях экспонирования, а также при отклонениях от номинала: ± 40 нм, 20 нм по фокусу, $\pm 2\%$ по дозе.

Далее с помощью обученной модели [4] РЭМ-снимки были отсортированы на те, в которых присутствовал (445 снимка), либо отсутствовал SRAF (165 снимков). Пример снимков указан на рис. 1.

На основании РЭМ-снимков, топологии и оптической модели проекционной установки рассчитано воздушное изображение вспомогательных структур и подобран порог проработки SRAF.

Далее была спроектирована ячейка тестовых структур с различными конфигурациями SRAF. В целях выбора оптимальных конфигураций вспомогательных структур была использована модель проработки SRAF, с помощью которой отсеяны структуры, достигшие порога проработки. Второй этап отсева заключался в оценке процессного окна критической структуры. Выбраны те, конфигурации, которые вносят наибольший вклад в расширение окна процесса изолированной линии размером 30 нм.

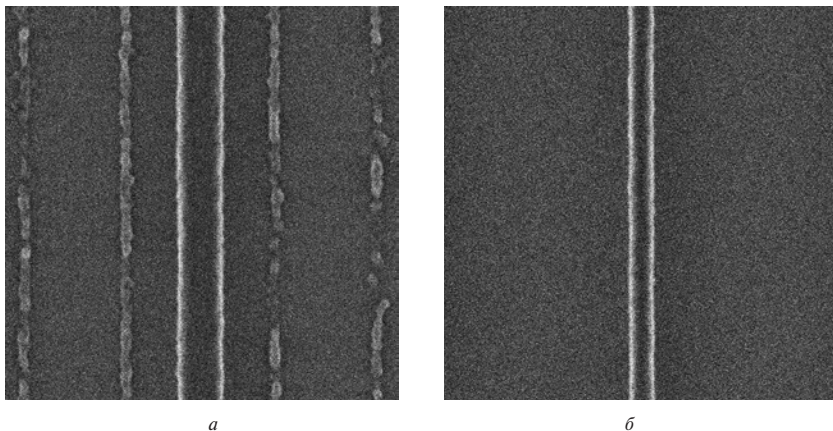


Рис. 1. РЭМ-снимки тестовых структур: *а)* с проработанными SRAF, *б)* без SRAF

Заключение

В работе проведен анализ проработки SRAF при разных режимах экспонирования. На основе анализа выбраны оптимальные правила расстановки вспомогательных структур. Дальнейшая работа заключается во внедрении этих правил в рецепт коррекции эффектов оптической близости для затворного слоя проектной нормы 28 нм.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах. — Москва, 2012.
2. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
3. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
4. Московцев А. Ф., Харченко Е. Л. Применение алгоритмов машинного обучения для детектирования SRAF-структур на SEM-изображениях // 65-я всероссийская научная конференция МФТИ, 2023.

УДК 51-74

Разработка методики проектирования универсального фотошаблона калибровочных тестовых структур

Уткина А. А., Харченко Е. Л.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

autkina@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

в работе рассмотрены особенности проектирования универсального фотошаблона на примере контактов и переходных отверстий. Выбраны конфигурации тестовых структур; на основе воздушного изображения определены границы варьирования размеров тестовых структур; разработан скрипт, отсеивающий структуры, которые не удовлетворяют правилам проектирования заданной проектной нормы.

Ключевые слова: калибровочные тестовые структуры; полуэмпирическая резистивная модель; фотошаблон; интегральные схемы; вычислительная фотолитография; разрешающая способность фотолитографии.

Введение

Техники повышения разрешающей способности фотолитографии критически важны при производстве интегральных схем [1, 2]. Для применения данных техник требуется моделирование изображения в слое фоторезиста, таким образом, возникает необходимость закладывать и измерять тестовые структуры (ТС) на пластине. Как правило, под каждую задачу (отладка материала, добавление нового слоя и т. д.) закладывают свой набор конфигураций ТС. От разнообразия и корректности ТС будет зависеть качество откалиброванной резистивной модели [3]. Проектирование ячейки ТС мало описано в открытом доступе. Основная сложность заключается в ограничении площади для размещения ячейки [4]. Необходимо осуществить мультипликацию всего набора ТС на маске 4–9 раз. Это позволит проанализировать разброс измерений по кадру и оценить надежность работы литографической установки.

Основная часть

В работе проводится исследование особенностей различных конфигураций ТС для проектирования универсального фотошаблона калибровочных ТС (КТС). На основе анализа подготавливается набор ТС, занимающий все свободное место на кадре. Далее этот набор пригоден для использования в качестве исходных данных при калибровке модели фоторезиста различных слоев и проектных норм.

Алгоритм работы с этим фотошаблоном:

1. Генерация универсального набора ТС.

Все ТС можно разделить по следующим блокам: ТС без коррекции; ТС с коррекцией; ТС для определения порога проработки вспомогательных элементов (SRAF) и элементы реального дизайна. Эти блоки должны охватывать конфигурации контактов и линий. При проектировании ТС рассматриваются такие параметры, как ширина, зазор между элементами, параметры коррекции, ширина SRAF и другие;

2. Выбор технологии, которую необходимо рассмотреть.

На основе правил проектирования (DRM — design rule manual) по норме 90 нм был определен интересующий нас слой, конфигурации и минимальные параметры, которые для него пригодны;

3. Отсев структур на основании DRM.
Рассматриваются ТС, удовлетворяющие требованиям DRM;
4. Подготовка выборки для передачи ее метрологам.
Анализ набора ТС проводится по параметрам воздушного изображения (ВИ): отсев по проработке ТС с выбранным источником, фильтрация и разделение множества на калибровочное и верификационное [5].

Для контактов и переходных отверстий были выделены часто встречающиеся конфигурации — это плотные и изолированные квадраты. На примере блока ТС без коррекции была рассмотрена зависимость ВИ от параметров этих ТС. Пришли к выводу, что можно определить граничное значение зазора между контактами, при котором ТС еще рассматривается как плотная; при изменении горизонтальной ширины, вертикальный зазор не вносит существенного влияния. При изучении ТС с коррекцией можно ограничить диапазон проектируемой области.

Выводы

В результате работы будет спроектирована матрица КТС для контактов и переходных отверстий, пригодная для изучения технологий 28–250 нм. Примеры полученных размеров ячеек, включающих одну конфигурацию: 373,30×7,25 мкм и 1610,15×264,00 мкм. Разработан скрипт, отсеивающий структуры согласно DRM, что позволяет использовать ячейку при калибровке различных слоев и проектных норм.

В рамках дальнейшей работы будут добавлены новые конфигурации из группы линий для учета других критических слоев, например, металла, активной области и т. д.

Литература

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники, 2012. — С. 539–563.
2. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
3. Mack S. A. The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.4.
4. Харченко Е.Л., Соколова Е.В. Методика формирования тестовых ячеек для включения в MPW-запуск // Наноиндустрия, 2020. — № 5 (102). — С. 842–844.
5. Уткина А.А., Харченко Е.Л. Исследование и доработка алгоритмов минимизации набора тестовых структур для калибровки модели фоторезиста // Наноиндустрия, 2023. — № 5 (119). — С. 584–588.

УДК 004.852

Применение алгоритмов машинного обучения для детектирования дефектов на SEM-изображениях

Московцев А. Ф.^{1,2}, Харченко Е. Л.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
moskovtsev.af@phystech.edu

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В данной работе проводится анализ результатов применения моделей FasterRCNN, RetinaNet, YoloV5 с использованием стандартного набора гиперпараметров для решения задачи детекции различных типов структур на SEM-изображениях.

Ключевые слова: детектирование объектов; детектирование дефектов в полупроводниковой отрасли; машинное обучение; глубокое обучение; YoloV5; FasterRCNN; RetinaNet.

Введение

Область детектирования изображений с использованием глубокого обучения постоянно развивается — появляется множество новых техник и моделей, которые находят применение в промышленном производстве [1]. Одной из таких возможных областей применения является детектирование дефектов в полупроводниковой отрасли. Автоматическое детектирование дефектов позволяет значительно снизить временные/трудовые ресурсы при анализе большого количества снимков (200 и более). Сканирующий электронный микроскоп производит изображения с высоким разрешением в нанометровом масштабе. Шум на SEM-изображениях и постоянное уменьшение тех. процесса приводят к сбою традиционных методов обработки изображений на основе правил для нахождения дефектов [2]. Это вызвало научный интерес к применению алгоритмов машинного обучения, в особенности глубокого обучения, из-за их способности лучше справляться с шумом и изменениями масштаба. Данные методы найдут дальнейшее применение при отборе изображений хорошего качества для проведения калибровки модели фоторезиста.

Датасет

Для создания датасета использовался набор из 350 SEM-изображений размером 1024×1024 формата '.tiff'. Исходный набор был разделен на тренировочную, валидационную и тестовую выборки в соотношении 71:19:9. Исходные изображения были уменьшены до размера 640×640 для оптимальной работы нейронной сети. В процессе анализа имеющихся изображений было выделено 6 типов структур: SRAF, NORMAL, BRIDGE, NON-BRIDGE, COLLAPSE, GAP. Пример каждого типа данных структур отражен на рис. 1.

Эксперимент

В работе проведен сравнительный анализ моделей одностадийных (YoloV5 и RetinaNet) и двустадийных детекторов (FasterRCNN). В силу небольшого размера датасета было решено использовать предобученные на датасете MSCOCO (Microsoft

Common Object in Context) модели. Для обучения использовались две предобученные модели из семейства YoloV5: YoloV5s(small), YoloV5m(medium), которые отличаются количеством параметров. Также отдельно был проведен эксперимент с заморозкой первых 15 слоев у модели YoloV5m. У моделей Retina и FasterRCNN в качестве базовой сети для извлечения признаков использовалась предобученная модель ResNet 50 FPN. Вначале был проведен эксперимент с работой вышеперечисленных моделей со стандартным набором гиперпараметров.

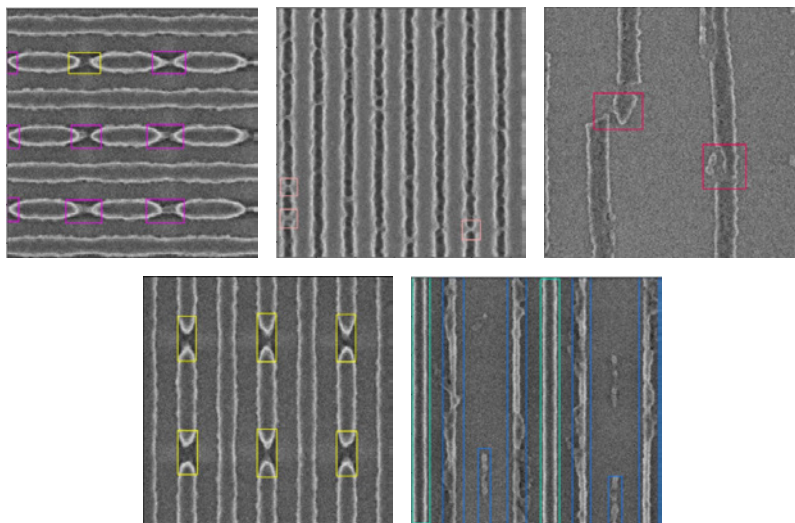


Рис. 1. Типы структур. Желтый цвет — NON-BRIDGE; фиолетовый цвет — BRIDGE, красный цвет — COLLAPSE, розовый цвет — GAP, синий цвет — SRAF, бирюзовый цвет — NORMAL

Для модели, показавшей наилучший результат, был проведен эксперимент с применением случайных вертикальных поворотов к изображениям в предположении, что данная аугментация повысит mAP [3].

Результаты

В табл. 1 отражены результаты эксперимента. Из таблицы видно, что при стандартном наборе гиперпараметров лучше всего показала себя модель FasterRCNN, достигнув точности $mAP_{0.5}$ равной 0,83.

Применение случайных вертикальных поворотов в качестве аугментаций к данным не привело к ожидаемому приросту точности детектирования. В дальнейшем будет осуществлена оптимизация гиперпараметров для модели FasterRCNN, включая более подробный сравнительный анализ аугментаций к данным.

Таблица 1. Средняя точность по каждому классу при разных значениях порога IoU и для всех классов для различных архитектур нейросетей

Модель	AP(@0.5:0.95)						Для всех структур	
	SRAF	NORMAL	BRIDGE	NON-BRIDGE	COLLAPSE	GAP	mAP_0.5	mAP_0.5:0.95
Retina	0,502	0,819	0,552	0,789	0,073	0,553	0,723	0,548
YoloV5s	0,628	0,838	0,358	0,56	0,279	0,304	0,776	0,495
YoloV5m	0,649	0,844	0,227	0,564	0,242	0,325	0,73	0,475
YoloV5m заморозкой слоев	0,464	0,702	0,391	0,452	0,05	0,227	0,686	0,381
FasterRCNN	0,830	0,936	0,835	0,858	0,427	0,437	0,83	0,72

Литература

1. Балан Н. Н., Березин А. А., Горнев Е. С., Иванов В. В., Ипатова Е. В., Кузовков А. В., Шканакина М. Д. Использование нейросетевых алгоритмов в вычислительной литографии. — 2020. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.543.548
2. Bappaditya Dey. Machine Learning Algorithms and Architectures for SEM Based Defect Inspection and Metrology Challenges in Semiconductor Manufacturing, 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.33225.01127.
3. Enrique Dehaerne, Bappaditya Dey, Sandip Halder, Stefan De Gendt. Optimizing YOLOv7 for semiconductor defect detection // Proc. SPIE 12496, Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII, 124962D (27 April 2023). DOI: 10.1117/12.2657564.

УДК 51-74

Исследование применимости параметра ядра плотности при подборе оптимальной формы компактной модели ФРМ

Степанова М. Г.^{1,2}, Харченко Е. Л.¹¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

mstepanova@niime.ru, ekharchenko@niime.ru

Исследована связь между оптимальным параметром ядра свертки в компактной модели фоторезиста и характерными размерами топологических структур. Рассмотрено влияние параметра ядра на сходимость модели в зависимости от вида порогового уравнения. Проведено сравнение моделей с различными конфигурациями ядер.

Ключевые слова: вычислительная литография; компактная модель фоторезиста; VT5-модель; функция Гаусса; функция TopHat; ядра плотности.

Введение

Фотолитография занимает центральное место в процессе производства интегральных схем. Чаще всего именно фотолитография определяет возможности формирования того или иного полупроводникового прибора, так как разрешающая способность фотолитографии определяет предельно воспроизводимые размеры его элементов [1, 2]. При уменьшении размеров топологических структур до величин, сравнимых с длиной волны экспонирующего излучения, возникают дифракционные эффекты, которые искажают переносимое на кремний изображение [3]. Для повышения разрешающей способности фотолитографии используются различные методы, в том числе коррекция эффектов оптической близости (OPC — optical proximity correction), для проведения которой необходима достоверная модель фоторезиста.

Компактные модели фоторезиста с ядрами плотности

Необходимость в разработке моделей, обладающих высокой скоростью вычисления и достаточной точностью, привела к развитию полуэмпирических моделей, называемых компактными [4]. Компактная модель фоторезиста представляет собой полином, параметрами которого являются характеристики распределения интенсивности на поверхности фоторезиста — параметры воздушного изображения. Помимо этих членов в полином также могут входить ядра свертки, характеризующие плотность расположения структур в топологическом слое. В рамках данной работы было выдвинуто предположение о взаимосвязи оптимального параметра ядра свертки и некоторым характерным для конфигурации слоя размером. Для поиска этой взаимосвязи был рассмотрен топологический слой первой металлизации проектной нормы 90 нм. Рассматривались компактные модели с переменным порогом, содержащие в себе ядра свертки вида функции Гаусса (1) и вида функции цилиндрической поверхности (2):

$$K(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где (x, y) — координата точки расчета воздушного изображения; σ — размер ядра.

$$K(x, y) = \begin{cases} 1, & r_1 > r \geq r_2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (2)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; (x, y) — координата точки расчета воздушного изображения; r_1, r_2 — внутренний и внешний радиус ядра.

Производилась калибровка этих моделей для различных значений параметра ядра и сравнение моделей между собой по величине среднеквадратичного отклонения (СКО) смоделированных размеров структур от измеренных на пластине (3):

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_i (CD_i - CD'_i)^2}{n}}, \quad (3)$$

где CD_i — измеренный на пластине размер i -й структуры; CD'_i — смоделированный размер i -й структуры; n — количество структур, используемое при моделировании.

На основании анализа рассматриваемых слоев предложен алгоритм определения оптимального параметра ядра свертки на основании характерных размеров зазоров у структур слоя. Предполагается, что оптимальная величина параметра зазора в окрестности 1/6 ширины зазора, сливающегося при моделях без ядра свертки. Предложенный алгоритм был опробован с помощью разделения структур слоев на калибровочное множество и верификационное тестовые множества (КТМ и ВТМ соответственно).

Заключение

Проверка предложенного алгоритма на указанных множествах показала соответствие найденного при его помощи параметра ядра для КТМ оптимальному параметру для ВТМ. Алгоритм может быть применен для поиска оптимального параметра ядра свертки в рамках технологий, использующих VT5 модели фоторезиста.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах. — Москва, 2012.
2. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. С. 124–128.
3. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
4. Smith M. D., Byers J. D., Mack C. A. A Comparison between the Process Windows calculated with Full and Simplified Resist Models // Optical Microlithography XV. SPIE, 2002. Vol. 4691. P. 1199–1210.

УДК 004.41

Платформа для взаимодействия с заказчиком и автоматизации внутренних процессов предприятия

Медведев К. А.¹, Иванов В. В.¹, Жаворонкин Ю. Г.¹, Рябинин А. Д.^{1,2}
¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, б, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

kmedvedev@niime.ru, vlaivanov@niime.ru, yjavoronkin@niime.ru,

aryabinin@niime.ru

В работе рассмотрены основные аспекты разработки платформы, в рамках которой интегрируются сервисы предприятия для внешних и внутренних заказчиков. Описана реализации сервиса для проектирования фотошаблонов и автоматизации сопутствующих процессов.

Ключевые слова: платформа для взаимодействия; «единое окно»; проектирование фотошаблонов.

Введение

В условиях растущей конкуренции крупные компании, предоставляющие услуги в области микроэлектроники, сталкиваются с необходимостью разработки удобных механизмов для коммуникации с заказчиками, обмена документами и файлами, проведения согласований и обеспечения доступа к сервисам. Не теряет актуальности и вопрос автоматизации связанных с этими сервисами внутренних процессов, таких как выполнение маршрутов проектирования, обработка и хранение больших объемов информации, вычислительные задачи [1].

В работе рассматриваются особенности реализации платформы для интеграции сервисов АО «НИИМЭ», которая повышает конкурентоспособность компании на рынке за счет:

- создания «единого окна» для доступа к сервисам компании;
- обеспечения прозрачности жизненного цикла работ;
- применения электронного документооборота;
- оперативной коммуникации между заказчиком и исполнителями;
- предоставления посреднических услуг между заказчиком и различными исполнителями;
- высокого уровня автоматизации процессов.

Архитектура платформы

Архитектурная схема платформы показана на рис. 1. На этапе выбора варианта реализации принято решение вести разработку на базе ПК «Личный кабинет», который содержит готовые модули общего назначения, а также аттестованные модули для приема информации и входного контроля топологий [2]. Вся технологическая информация хранится в централизованной базе данных.

Взаимодействие внешних заказчиков с порталом происходит через корпоративный межсетевой экран. Доступ к сервисам заказчик получает через модуль «Кабинет заказчика». В роли внутренних заказчиков выступают главные конструктора

(ГК), уполномоченные и замещающие лица (УЛ, ЗЛ). Вся необходимая функциональность для ГК сосредоточена в модуле «Кабинет ГК».

Для решения внутренних задач при выполнении процедур в рамках сервиса разработаны вспомогательные модули, доступ к которым имеют задействованные в процессе специалисты (технологи, топологи, разработчики библиотек и т.д.).

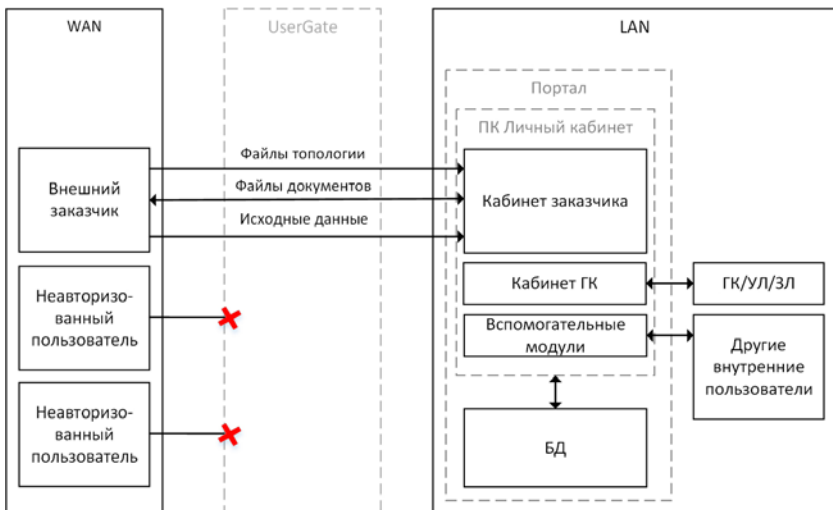


Рис. 1. Архитектура платформы

Сервис для проектирования фотошаблонов

Анализ бизнес-процессов, связывающих дизайн-центры, фабрики изготовления фотошаблонов и заводы производители микроэлектроники, выявил ряд проблем в области коммуникации, обмена и актуализации информации, выработки единых норм и требований [2]. В рамках описанной платформы реализован универсальный сервис для проектирования фотошаблонов, позволяющий эффективно решать эти проблемы и предоставляющий заказчику следующие возможности:

- формирование заявок на проектирование фотошаблонов для внешних заказчиков;
- передачу топологических файлов через портал;
- отслеживание статуса и хода выполнения работ;
- коммуникацию и обмен документами между участниками процесса;
- согласование результатов работ.

Заключение

Разработка универсальной платформы для доступа к сервисам компании позволяет существенно повысить конкурентоспособность предприятия и его привлекательность для внешних заказчиков. Применение электронного документооборота, элементов электронного согласования и высокий уровень автоматизации внутренних

процессов существенно сокращает временные затраты и снижает вероятность возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором.

Разработанный в рамках платформы сервис для проектирования фотошаблонов снимает с заказчика необходимость адаптироваться к требованиям различных фабрик для изготовления фотошаблонов, значительно упрощает процесс проектирования и обеспечивает прозрачность жизненного цикла работ.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Иванов В. В., Панкратов А. Л., Рябинин А. Д. Автоматизация работы с дизайн-центрами при заказе пластин на российской фаундри // Международный форум «Микроэлектроника-2017». Сборник тезисов 3-й Международной научной конференции, 2017. — С. 296–298.

УДК 004.89

Программная система предиктивного анализа востребованности научных публикаций

Капкин И. Д.^{1,2}, Рябинин А. Д.^{1,3}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

ikapkin@niime.ru, aryabinin@niime.ru

В данном исследовании была разработана комплексная программная система для предиктивного анализа спроса на научные публикации. В систему интегрированы различные модули предварительной обработки текстовых данных, используются онтологии семантических сетей и прогностическая модель, основанная на логистической регрессии.

Ключевые слова: анализ данных; обработка естественного языка; научные публикации.

Введение

В эпоху цифрового информационного взрыва научное сообщество генерирует огромное количество публикаций, охватывающих широкий спектр областей исследований [1]. Анализ этих научных публикаций и понимание их спроса может дать ценную информацию исследователям, издателям и учреждениям.

Целью данной работы является разработка интеллектуальной системы обработки больших текстовых данных в контексте научных публикаций. Система нацелена на то, чтобы выйти за рамки традиционных подходов, основанных на ключевых словах, и использовать передовые методы обработки естественного языка и машинного обучения для анализа и прогнозирования спроса на научные публикации.

Разработка программной системы

В ходе аналитического обзора существующих аналогов в сфере анализа текстовых больших данных были выявлены основные концепты, которые должны быть включены в организацию программной системы. Так, было предложено создание трех основных последовательно связанных модулей: предварительной обработки, извлечения признаков и прогностической модели.

Модуль предварительной обработки текста включает в себя передовые методы, такие как:

- токенизация с использованием SentencePiece;
- выделение корней с помощью Snowball;
- удаление стоп-слов с помощью TF-IDF;
- лемматизатор SpaCy.

Эти этапы предварительной обработки повышают качество и согласованность текстовых данных, обеспечивая более точный анализ [2].

Чтобы стандартизировать терминологию и установить структурированные отношения между авторами и публикациями, используются онтологии семантических сетей [3]. Используя этот подход, становится возможным эффективно определять важных авторов и темы, что способствует лучшему анализу.

Использование фреймворка RDF расширяет возможности программного обеспечения, предоставляя структурированную структуру для представления и запроса отношений между авторами и публикациями. Этот подход позволяет более точно идентифицировать значительных авторов и определить влиятельные темы в научной литературе.

Чтобы выделить основные темы из данных, используется скрытое распределение Дирихле. Это помогает выявить скрытые тематические закономерности в публикациях, и получить представление об основных областях научных интересов [4].

Наконец, была внедрена прогностическая модель, использующая логистическую регрессию для прогнозирования важности данной публикации. Обучив модель на существующих данных, возможно прогнозировать значимость будущих публикаций.

Заключение

В целом, разработанное программное обеспечение предлагает комплексное решение для предиктивного анализа востребованности публикаций. Интеграция передовых методов предварительной обработки текста, семантических сетей, скрытого распределения Дирихле и прогнозирования на основе логистической регрессии может помочь исследователям принимать обоснованные решения и оптимизировать свои стратегии публикации.

Литература

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Перкинс Дж. Python Text Processing with NLTK 2.0 Cookbook, 2010 [На англ. яз.]. — 272 с.
3. Хит Т., Бизер Ч. Linked Data: Evolving the Web into a Global Data Space. Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology, 2011 [На англ. яз.]. — 122 с.
4. Блей Д. М., Фанг А. И., Джордан М. И. Latent dirichlet allocation, 2003 // Journal of Machine Learning Research [На англ. яз.]. — С. 993–1022.

УДК 621.38-022.532

Нейропластичность нанокристаллических пленок LiNbO_3 для синаптических устройств

Хахулин Д. А., Вакулов З. Е., Дзюба Д. А., Смирнов В. А.

*Лаборатория нейророботоники и мемристивных наноматериалов (Нейромена), Институт Нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
dhahulin@sfn.ru*

Исследованы мемристивные и нейроморфные свойства нанокристаллических пленок LiNbO_3 применительно к задачам воспроизведения нейропластичности биологических нейронов в синаптических устройствах

Ключевые слова: мемристор; резистивное переключение; импульсное лазерное осаждение; ниобат лития; нейроморфные системы

Введение

Возможности современной микро и наноэлектроники по дальнейшему уменьшению топологических норм с одновременным увеличением производительности ограничены фундаментальными физическими принципами [1, 2]. В том, что касается обработки задач искусственного интеллекта перспективным видится переход к воспроизведению строения человеческого мозга [3, 4] т.н. нейроморфной электронике. Одним из перспективных материалов в этой сфере считается LiNbO_3 [5, 6].

Исследование нейроморфных свойств нанокристаллических пленок LiNbO_3

Методом импульсного лазерного осаждения были получены пленки LiNbO_3 на подложке SiO_2 . Методами АСМ и РЭМ было установлено, что толщина пленки составляет ~100 нм при шероховатости ~12 нм.

Исследование мемристивных свойств нанокристаллического LiNbO_3 показало, что материал демонстрирует биполярное переключение с максимальным соотношением сопротивлений в низко- и высокоомном состояниях ~500. Напряжение записи/перезаписи, при этом может достигать ± 6 В, а в некоторых случаях ± 15 В. Из-за таких высоких напряжений LiNbO_3 хуже показывает себя в наработке на отказ и элемент деградирует уже к 50 циклу при тестировании в диапазоне $[-5$ В, 5 В]. Тем не менее, за счет подбора оптимальных значений напряжений записи, перезаписи и чтения, нанокристаллический LiNbO_3 стабилен в endurance тесте и выдерживает до 10^4 циклов записи/перезаписи с соотношением сопротивлений в высоко-и низкоомных состояниях ~10.

Исследование PPF и PPD характеристик показало, что подача импульсов длительностью 0,2 мс и таким же интервалом приводит к приросту отклика почти в 2,5 раза. Увеличение интервала до 0,4 мс приводит к уменьшению отклика в восемь раз. Исследование пластичности, зависимой от времени спайка (STDP), показало, что отклик LiNbO_3 согласуется с асимметричным правилом Хебба.

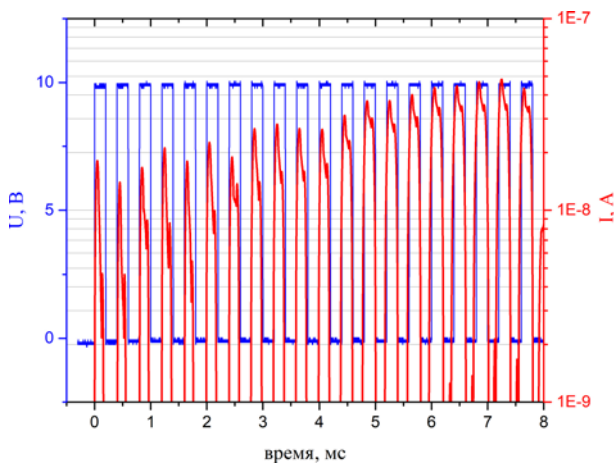


Рис. 1. Результат PPF теста при времени импульса 0,2 мс и задержке между импульсами 0,2 мс

Заключение

Результаты исследования подтверждают перспективность применения LiNbO_3 в синаптических устройствах нейроморфной электроники. Гибкость метода ИЛО открывает возможности по созданию нанокompозитов на основе LiNbO_3 для дальнейшего повышения эксплуатационных свойств материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-1123)

Литература

1. Hoeneisen B., Mead C. A. Fundamental limitations in microelectronics—I. MOS technology // *Solid-State Electronics*, 1972. Vol. 15. № 7. P. 819–829.
2. Markov I. L. Limits on fundamental limits to computation // *Nature*, 2014. Vol. 512. № 7513. P. 147–154.
3. Mead C. Neuromorphic electronic systems // *Proceedings of the IEEE*, 1990. Vol. 78. № 10. P. 1629–1636.
4. Мария Недюк, Алексей Лазуренко (2023) Самый правильный компьютер — человеческий мозг // *Известия: Спецпроект «НИЦ «Курчатовский Институт» 80 лет» 2023*. — С. 2–4. Электрон. версия. — URL: http://nrcki.ru/files/pdf/iz_2023041201.pdf Дата публикации: 27.04.2023.
5. Zhao Y. et al. LiNbO_3 dynamic memristors for reservoir computing // *Frontiers in Neuroscience*, 2023. Vol. 17. P. 573.
6. Rylkov V. V. et al. Transport, magnetic, and memristive properties of a nanogranular $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_y)_{100-x}$ composite material // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2018. Vol. 126. P. 353–367.



УДК 004.032.26, 621.3.

Компонентная база для сетей LSTM на основе мемристивных кроссбаров

Кипелкин И. М., Громов Н. В., Леванова Т. А., Герасимова С. А.

ННГУ им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Ivan.kipelkin@yandex.ru

В данной работе мы описываем компонентную базу для реализации нейронной сети архитектуры долгой краткосрочной памяти с использованием топологии мемристивных кроссбаров. Мы предлагаем дизайн мемристора, кроссбара, сложных функций на его основе в среде Simulink.

Ключевые слова: глубокая нейронная сеть; долгая краткосрочная память; мемристивные устройства; архитектура кроссбар.

Введение

Сеть долгой краткосрочной памяти (LSTM) — это тип рекуррентной нейронной сети, который был разработан для преодоления ограничений классических рекуррентных сетей в моделировании долгосрочных зависимостей [1]. Мемристивные устройства отвечают за хранение внутреннего состояния и обеспечивают поток информации. Однако современные сети LSTM с большим количеством параметров имеют ограничение в вычислительной мощности, возникающее как из-за ограниченного объема памяти, так и из-за ограниченной пропускной способности передачи данных. Использование инновационных аппаратных платформ, например, основанных на мемристивных устройствах, позволяет хранить большое количество параметров и предоставляет возможность организации вычислений в памяти [2, 3]. Кроссбар представляет собой матрицу мемристоров [4], которая используется для хранения и обработки весовых коэффициентов нейронных сетей. Мемристивные кроссбары являются небольшими по размеру и энергоэффективными, а потому все чаще используются для разработки имплантируемых устройств.

Архитектура мемристивного кроссбара

Кроссбар представляет собой архитектурное решение, в котором многоуровневая матрица из мемристоров используется для хранения и обработки весовых коэффициентов нейронной сети. Входной вектор данных поступает на мемристоры через входной слой нейронов. Затем происходит вычисление новых значений скрытых состояний сети LSTM и обновление коэффициентов (весов) связей между нейронами. Использование кроссбара на мемристивных элементах позволяет эффективно хранить и обрабатывать веса нейронной сети непосредственно в матрице мемристоров, что приводит к улучшению энергоэффективности и производительности по сравнению с традиционными архитектурами, основанными на центральных или графических процессорах.

Для построения нейронной сети архитектуры долгой краткосрочной памяти было проведено моделирование в системе Simulink необходимых компонентов. Была создана модель мемристора, схема которой представлена на рис. 1. В нашей модели мы используем стандартное определение мемристора, представляя его как динамическую систему [5]. Такое представление основано на механизмах переноса

электронов и ионов внутри устройства в ответ на электрическое воздействие. Далее на основе разработанной схемы одного мемристового элемента была построена модель мемристового кроссбара. Проведены симуляции, подтверждающие работоспособность описанного подхода.

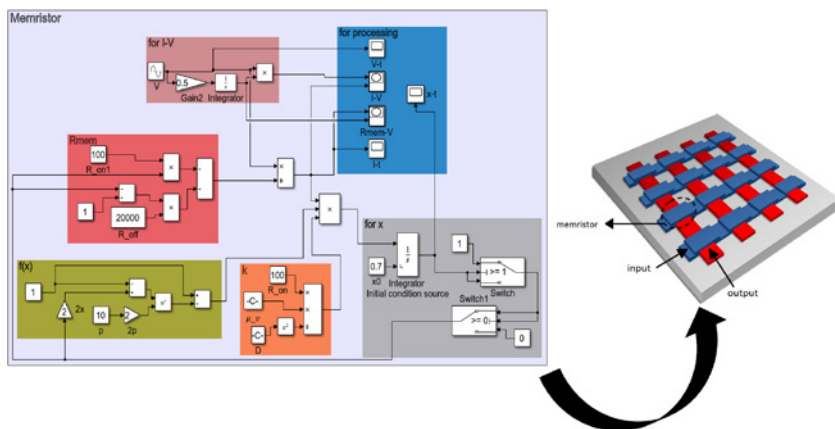


Рис. 1. Модель мемристового устройства в Simulink и типичная кросс-бар топология

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-71-00112)

Литература

1. Dudukcu H. V. et al. Temporal Convolutional Networks with RNN approach for chaotic time series prediction // *Applied Soft Computing*, 2023. Vol. 133. P. 109945.
2. Pham V. T. et al. Neuromorphic Memristive Computation: Where Memristor-Based Designs Meet Artificial Intelligence Applications // *Frontiers in Physics*, 2022. Vol. 9. P. 805.
3. Gerasimova S. A., Lebedeva A. V. et al. Memristive neural networks for predicting seizure activity, 2023.
4. Jun L. et al. A spintronic memristor crossbar array for fuzzy control with application in the water valves control system // *Measurement and Control*, 2019. Vol. 52. № 5–6. P. 418–431.
5. Chua L. O., Kang S. M. Memristive devices and systems // *Proceedings of the IEEE*, 1976. P. 209–223.

УДК 621.38-022.532

Мемристивные свойства конденсаторных структур на основе оксида гафния

Швецов Б. С.^{1,2}, Мартышов М. Н.¹, Жигунов Д. М.³

¹ Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

³ Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 30
b.shvetsov15@physics.msu.ru

В данной работе проведено исследование эффекта резистивного переключения в многослойных структурах на основе тонкого слоя оксида гафния, заключенного между двумя металлическими электродами. Оксид гафния в настоящее время рассматривается как один из самых перспективных металлоксидных материалов для создания мемристивных систем, которые полностью совместимы с КМОП-технологией.

Ключевые слова: мемристоры; резистивное переключение; нейроморфные вычисления; искусственный интеллект.

Введение

В настоящее время классические вычислительные системы, которые основаны на архитектуре фон Неймана с разделением устройств хранения данных от устройств их обработки, практически достигли своего предела развития. Мемристор широко рассматривается как компонент для создания новых типов памяти и нейроморфных вычислительных систем. Принцип его работы основан на эффекте резистивного переключения (РП), который заключается в изменении удельного электрического сопротивления при приложении определенного электрического напряжения [1]. Благодаря такому принципу мемристоры могут иметь несколько резистивных состояний и хранить заданное резистивное состояние после снятия электрического поля. Эти свойства позволяют использовать мемристоры в нейроморфных вычислительных системах (НВС) в качестве аналогов синапсов, которые связывают нейроны в биологических системах и выполняют роль запоминающих ячеек [2]. Эффект РП был обнаружен во многих неорганических (оксиды металлов, нитриды, халькогениды и т. д.) и органических материалах (поли-*n*-ксилилен и другие) [3]. Для повышения стабильности работы мемристоров предлагается использование различных добавок для модификации диэлектрического слоя мемристора, изменение структуры металлических контактов, а также добавление дополнительных проводящих слоев [4].

Резистивное переключение конденсаторных структур

Многослойные структуры $\text{Me}/\text{HfOx}/\text{Au}$, исследованные в работе, были получены на подложке монокристаллического кремния *c*-Si методом электронно-лучевого напыления с использованием напылительной системы Angstrom Nexdep. Сначала на подложку наносился слой Au толщиной 50 нм, который выступал в роли нижнего электрода. Затем наносился диэлектрический слой HfOx толщиной от 20

до 30 нм. Сверху на слой оксида гафния через теньевую маску наносились металлические контакты размером $0,2 \times 0,5$ мм². В качестве материала верхних контактов использовались такие металлы, как Au, Cu и Ti.

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики, полученные для структуры Au/HfO_x/Ti с толщиной диэлектрического слоя 30 нм. Переключение в проводящее состояние происходит при достаточно низких напряжениях, не превышающих 1,5 В. Для данной структуры было получено 16 стабильных резистивных состояний с сопротивлениями в диапазоне от 2 до 100 кОм. Также была показана выносливость, демонстрирующая не менее 50 циклов переключения из непроводящего состояния и обратно. Полученные предварительные данные свидетельствуют о перспективах дальнейших исследований структур Au/HfO_x/Me для создания стабильных и эффективных мемристивных систем.

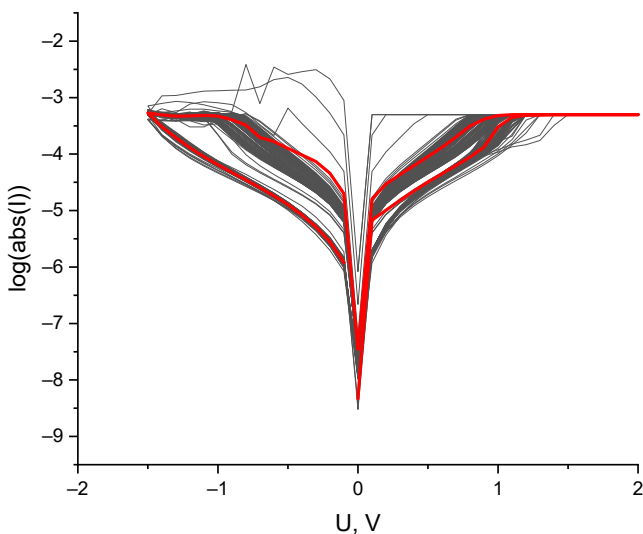


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика структуры Ti/HfO_x/Au. Отдельной линией показано усреднение данных за 100 циклов переключения

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00268)

Литература

1. Ielmini D., Waser R. Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA), 756 p. (2016).
2. Shi T., Wang R., Wu Z., Sun Y., An J. and Liu Q. Small Struct. 2, 2000109 (2021).
3. Shvetsov B. S., Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Ilyasov A. I., Grishchenko Y. V., Zanaevskin M. L., Nesmelov A. A., Streltsov D. R., Patsaev T. D., Vasiliev A. L., Rylkov V. V. and Demin V. A. // Nanotechnology, 2022. 33, 255201.
4. Banerjee W., Liu Q., Hwang H. // Journal of Applied Physics, 2022. 127 051101.

УДК 004.383.8.032.26

Описание на Systemverilog вычислительного блока нейроморфного ядра

Исламгулова Х. И.^{1,2}, Теплов Г. С.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
islamgulova.kh@phystech.edu, gteplov@niime.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Представлено описание на systemverilog вычислительного блока нейроморфного ядра. Описываемый вычислительный блок представляет собой вычислительный конвейер, который реализует искусственный нейрон с LIF функцией активации. Для описания использовалась библиотека ЭКБ с топологическими нормами 180 нм.

Ключевые слова: нейроморфное ядро; systemverilog; LIF-нейрон; импульсная нейронная сеть.

Введение

Бурное развитие аппаратных средств для ИИ началось с теоретической работы LeCun'a по распознаванию рукописных символов архитектурой CNN [1]. Результаты этого исследования нашли практическое применение и ознаменовали новый этап в развитии приложений искусственного интеллекта, сопровождающийся, и частично обусловленный, развитием мощностей вычислительных средств. При проектировании аппаратной реализации искусственного интеллекта с использованием библиотек 180 нм возникает ряд проблем, связанных с технологическими особенностями данных библиотек: во-первых, низкая степень интеграции (современные вычисления требуют высокого уровня интеграции [2]); во-вторых, высокое энергопотребление в сравнении с меньшими технологическими нормами 90 нм — 11 нм. Перечисленные факторы обуславливают целесообразность разработки блока нейроморфного ядра для последующих аппаратных реализаций нейровычислителей т. к., само ядро требует меньшего уровня интеграции [3] и технические решения на основе этих ядер более энергоэффективны [3–6].

Вычислительный блок

Ранее авторами были рассмотрены архитектуры нейроморфных ядер и в ходе анализа были выделены пять основных блоков [7]. Вычислительный блок и блок памяти для хранения параметров нейронов являются наиболее независимыми от остальных частей ядра блоками, поскольку не подвержены ограничениям, которые накладываются реализациями интерфейсов обмена данными между ядрами. Выбор для описания на языке Systemverilog блока вычислений обуславливается тем, что блок памяти может быть реализован с помощью компилятора памяти и не требует дополнительной разработки.

Вычислительная мощность ядра определяется количеством встроенных конвейеров. Конвейер состоит из блока учета весовых коэффициентов входных сигналов, блока обобщения взвешенных входных сигналов и блока активации.

В данной работе авторами предложен вариант вычислительного блока нейроморфного ядра (рис. 1) включающий:

- 1) мультиплексоры (mux1, mux2) управляемые входными сигналами (*input1*, *input2*), для учета весовых коэффициентов входных сигналов *weight1*, *weight2*, мультиплексоры (mux3, mux4) управляемые сигналом результата схемы сравнения (comp1) для реализации функции активации,
- 2) сумматоры для вычисления взвешенной суммы входных сигналов (sum1) и текущего потенциала нейрона *potential* (sum2),
- 3) регистры для хранения результата взвешенной суммы (reg1), выходного импульса *spike* (reg2) и обновленного потенциала нейрона *change potential* (reg3),
- 4) схемы сравнения (comp1), сравнивающие потенциал нейрона после учета взвешенной суммы с значением порога (*threshold*),
- 5) схемы вычитания (sub1) для учета утечки *leaky*.

Вычислительный блок имеет два входа, соединенные с одним конвейером, реализующим один нейрон. Входные сигналы (*input1*, *input2*) — импульсы, что позволяет избежать выполнения операции перемножения весов (*weight1*, *weight2*) с входами. Сигналы *change potential*, *threshold*, *leaky*, *reset potential* имеют разрядность 3 бит; *potential* — 4 бит (учитывая возможность переполнения).

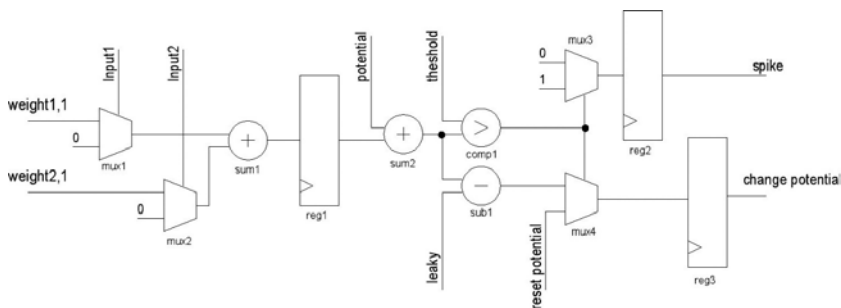


Рис. 1. Блок-схема нейрона, связанного с двумя входами

Заключение

Вычислительный блок с двумя входами и одной схемой нейрона (соответствующий рис. 1) был синтезирован в САПР Cadence на основе библиотеки 180 нм HCMOS8D. Всего было использовано 30 библиотечных ячеек, общая площадь составила 1460 мкм².

Литература

1. LeCun Y. et al. Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE, 1998. Vol. 86. № 11. P. 2278–2324.
2. Jouppi N. P. et al. In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit // Proceedings of the 44th annual international symposium on computer architecture, 2017. P. 1–12.

3. Акopyан F. et al. Truenorth: Design and tool flow of a 65 mw 1 million neuron programmable neurosynaptic chip // IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, 2015. Vol. 34. № 10. P. 1537–1557.
4. Deng L. et al. Tianjic: A unified and scalable chip bridging spike-based and continuous neural computation // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020. Vol. 55. № 8. P. 2228–2246.
5. Frenkel C. et al. A 0.086-mm² 12.7-pJ/SOP 64k-synapse 256-neuron online-learning digital spiking neuromorphic processor in 28-nm CMOS // IEEE transactions on bio-medical circuits and systems, 2018. Vol. 13. № 1. P. 145–158.
6. Davies M. et al. Loihi: A neuromorphic manycore processor with on-chip learning // Ieee Micro, 2018. Vol. 38. № 1. P. 82–99.
7. https://mipt.ru/upload/medialibrary/602/elektronika_-fotonika-i-molekulyarnaya-fizika.pdf.

УДК 004.942

Реализация цифровых двойников для мощных МОП-транзисторов с помощью ПО Python

Зубкова А. И., Харитонов И. А.

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
Alex2000zu@yandex.ru*

Приведено описание программы на языке Python, реализующей цифровые двойники для мощных МОП-транзисторов. Их работа проиллюстрирована на примере отечественных мощных ДМОП-транзисторов. Приведены примеры воспроизведения статических, динамических, тепловых характеристик МОПТ, экспорта SPICE-модели компонента.

Ключевые слова: цифровой двойник; МОП-транзистор; статические характеристики; тепловая модель; язык Python.

Введение

Создание цифровых двойников различных объектов является перспективным направлением в развитии систем анализа и моделирования сложных объектов и изделий. Для проектирования мощных схем управления, источников питания и др. необходимо иметь цифровые двойники мощных компонентов с описанием их характеристик [1]. В качестве силовых компонентов широко используются мощные МОП-транзисторы, что говорит о необходимости создания их цифровых двойников, описывающих их статические, динамические, тепловые и другие характеристики, их SPICE-модели. Данная работа посвящена созданию цифровых двойников для отечественных силовых компонентов [2].

Описание программы для реализации цифровых двойников мощных МОП-транзисторов

Для реализации цифровых двойников использовано ПО Python. Цифровые двойники воспроизводят статические вольт-амперные характеристики, динамические характеристики, тепловые параметры и характеристики [3].

Возможности вывода основных характеристик проиллюстрированы для отечественного транзистора 2П829Д.

На рис. 1 изображена зависимость тока стока от напряжения сток-исток при измененном напряжении затвора от 5 до 9 В, построенную с помощью цифрового двойника.

На рис. 2 изображены переходные характеристики транзистора, зависимость напряжения от времени, построенную с помощью цифрового двойника. Синим цветом обозначена зависимость напряжения на затворе, а оранжевым напряжения на стоке.

Цифровой двойник дает возможность экспорта SPICE-модели, для дальнейшей работы с ней в SPICE системах.

Программа воспроизводит тепловую модель и рассчитывает тепловые характеристики МОПТ. Цифровой двойник рассчитывает температуру кристалла МОПТ с условиями теплоотвода.

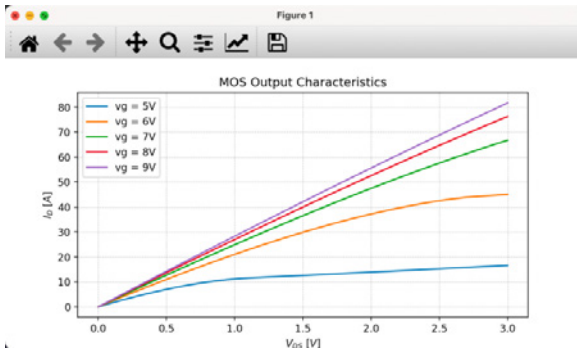


Рис. 1. Выходные ВАХ транзистора 2П829Д

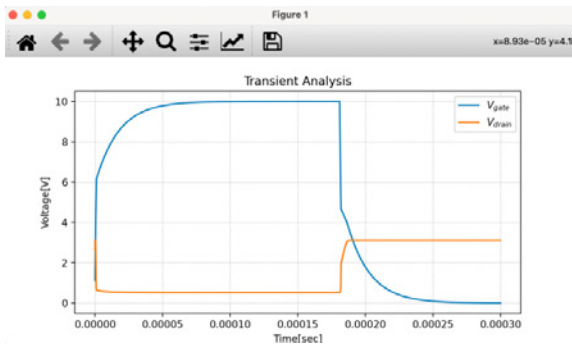


Рис. 2. Переходные характеристики цифрового двойника транзистора 2П829Д

На рис. 3 можно видеть тепловую модель транзистора 2П829Д с радиатором и без.

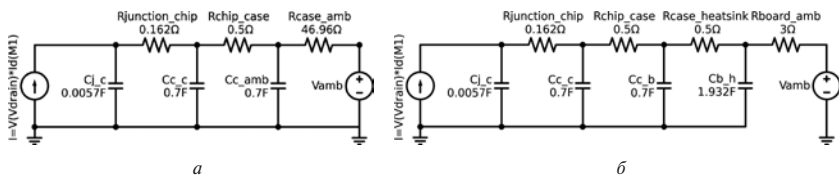


Рис. 3. Тепловая модель транзистора 2П829Д без радиатора (а); тепловая модель транзистора 2П829Д с радиатором (б)

Программа позволяет добавлять новые транзисторы, используя специальный интерфейс.

Исследование выполнено в рамках стратегического проекта НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация: технологии, эффекты, эффективность», за счет средств гранта в форме субсидии на реализацию Программы «Приоритет-2030»

Заключение

Работа созданного цифрового двойника продемонстрирована на примере отечественного МОП-транзистора 2П829Д, программа применима для различных типов транзисторов и корпусов. В дальнейшем планируется усовершенствование данной программы с помощью добавления новых моделей и возможностей.

Литература

1. Wright L., Davidson S. How to tell the difference between a model and a digital twin // Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences 7, Article number: 13 (2020).
2. Leander Van Cappellen, Martijn Deckers, Omid Alavi. A Real-time Physics Based Digital Twin for Online MOSFET Condition Monitoring // PV Converter Applications, Thermic 2022.
3. Tirthajyoti Sarkar. “Digital Twin” with Python: A hands-on example (2021). URL: <https://towardsdatascience.com/digital-twin-with-python-a-hands-on-example-2a3036124b61> (дата обращения: 25.01.2023).



УДК 004.89

Аппаратно-программный комплекс ИИ на основе отечественных процессоров

Рожин А. К., Бабинцев Л. В., Нефедов С. И., Соловьев Д. В.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20

akrozhin@edu.hse.ru, lvbabintsev@edu.hse.ru, snefedov@hse.ru

Компания VK, департамент ИИ

d.soloviev@corp.mail.ru

Рассмотрены возможности создания аппаратно-программных комплексов искусственного интеллекта на основе отечественных процессоров. Приводятся результаты оценки производительности эмулирования нейронных сетей на базе процессора «Эльбрус-8СВ».

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейронные сети; высокопроизводительные системы.

Распространение систем искусственного интеллекта (ИИ) ведет к повышенному спросу на вычислительные ресурсы, это особенно актуально для крупных компаний с многомиллионной аудиторией. Внедрение систем ИИ требует использования высокопроизводительных серверов, которые становятся значительной инвестиционной нагрузкой для компании, особенно учитывая факт запрета на импорт зарубежных вычислительных систем.

В докладе приводятся результаты исследования отечественного рынка элементной базы, подходящей для задач запуска нейронных сетей как для серверных, так и для мобильных задач. Представлены результаты разработки аппаратно-программного комплекса (АПК), включающего в себя сервер на основе процессора «Эльбрус-8СВ», нейроускоритель разработки АО «НТЦ «Модуль» и комплект оригинального программного обеспечения. Разработанный АПК позволяет максимально эффективно запускать любую современную нейронную сеть. В работе проведено сравнение созданного аппаратно-программного комплекса и сравнение его производительности с предыдущими версиями реализации нейронных сетей на базе «Эльбрус-8СВ» и процессоров компаний Intel и AMD.

Самая трудоемкая, с точки зрения вычислительных затрат, операция при реализации нейронных сетей — матричное умножение. Современные компиляторы не способны эффективно располагать данные в памяти компьютера, поэтому, зачастую, это делает программист специализированных математических библиотек или вендор процессорной системы. Размещение, или упаковка, матрицы в L1 кеше или в специализированных регистрах — это платформозависимый набор команд. В докладе приводится опыт расширения библиотеки ONNXRuntime на архитектуру e2k процессора «Эльбрус-8СВ» в целях эффективной реализации матричного умножения.

Проведенные экспериментальные запуски нейронных сетей на макете АПК показали прирост производительности на 25% по сравнению с предыдущими программными реализациями от вендора процессорной системы. С учетом проведенного инженерного анализа ожидается прирост производительности до 85%.

УДК 004.048

Исследование и автоматизация процесса классификации по причинам отказа ЭКБ методами машинного обучения

Чернова А. С.^{1,2}, Жевненко Д. А.¹, Мещанинов Ф. П.¹, Тельминов О. А.¹¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
achernova@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Реализованы алгоритмы для детектирования и классификации аномалий вольт-амперных характеристик транзисторов на основе методов машинного обучения. Используются подходы обучения без учителя. Алгоритм детектирования аномалий основан на автокодировщике, алгоритм классификации — на методе К-средних.

Ключевые слова: автоматизация; электроника; отказы; вольт-амперная характеристика; машинное обучение.

Процесс создания любого электронного изделия на основе ЭКБ включает в себя разработку, производство и тестирование (или контроль) [1]. Автоматизация этих процессов позволяет существенно снизить стоимость электронных изделий, сократить сроки проектирования, повысить скорость тестирования, что в конечном итоге влияет на повышение надежности и, как следствие, увеличение выхода годных [2]. При этом необходима комплексная автоматизация [3]. Многие технологические процессы уже автоматизированы средствами аппаратного и программного обеспечения. С применением методов на основе искусственного интеллекта можно достичь лучших результатов производительности тестирования, в частности контроля электрофизических параметров (ЭФП).

В данной работе разрабатывается методика регистрации отказа на основе методов машинного обучения и классификации зарегистрированных причин отказа. Причинами отказа могут быть снижение напряжения пробоя подзатворного диэлектрика или повышение тока утечки с истока на подложку. Основным признаком отказавших изделий являются аномалии в результатах тестирования.

В рамках работы рассматриваются результаты тестирования транзисторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе, с проектной нормой 180 нм при нескольких температурах. Данные представляют собой экспериментальные точки вольт-амперной характеристики (ВАХ) тока стока от напряжения стока и тока стока от напряжения на затворе. Имеется более тысячи MDM-файлов для каждой характеристики, всего 52 вида транзисторов с различными шириной и длиной канала. Каждый файл с характеристикой ток стока от напряжения на стоке содержит наборы с 111 значениями напряжений от 0 до 5,5 В и токами до 0,3 мА. Каждый набор снят при 10 различных напряжениях на затворе. Каждый файл с характеристикой ток стока от напряжения на затворе содержит наборы с 131 значениями напряжений от -1 до 5,5 В и токами до 0,6 мА. Каждый набор снят при 5 различных напряжениях на стоке. Известно, что файлов с аномалиями около 10% и 90% файлов без аномалий от общего числа файлов.

Исследовать данные в машинном обучении можно как временные ряды. То есть обнаружение аномалий ВАХ транзисторов можно обобщенно рассматривать как поиск аномалий во временных рядах, если считать временем ось напряжений. В ходе анализа нейронных сетей, подходящих для поиска аномалий, был выбран автокодировщик [4], который позволяет установить сложное правило контроля состояния взаимного расположения точек и проводить обучение без учителя в неразмеченных данных. На основе автокодировщика было проведено тестирование нескольких моделей нейронных сетей, которые отличались по структуре слоев, функции активации, числу эпох обучения. Для оценки качества построенных моделей использовались метрики бинарной классификации на размеченном датасете. Лучший результат у модели с 6 слоями и функцией активации SiLU, обученной на 50 эпохах — точность 96,7%.

Предложенный в работе алгоритм классификации аномалий основан на методе К-средних и осуществляет деление данных на К кластеров. Методом К-средних проведено разделение на несколько кластеров, для каждого количества кластеров посчитана ошибка — среднее отклонение точек от соответствующего центра кластера — которая уменьшается с увеличением числа кластеров. По зависимости ошибки от числа кластеров определено приблизительно оптимальное значение числа кластеров — 22.

Дальнейшая работа включает адаптацию решения к применению на задачах производства.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020.
2. Горнев Е. С. Обеспечение надежности современных интегральных микросхем. Часть 1. Принципы обеспечения качества и надежности в промышленной технологии производства ИС // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2020. — № 3. — С. 52–68.
3. Шагин А. В. и др. Основы автоматизации технологических процессов. — 2018.
4. Поиск аномалий во временных рядах [Электронный ресурс]. — URL: <https://habr.com/ru/articles/588320> (дата обращения: 25.04.2023).

УДК 535.3

Принципы построения фотонного генератора истинно случайных чисел

Пузатых И. П.^{1,2}, Сапегин А. А.¹, Барабаненков М. Ю.^{1,3}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Институт проблем технологии микроэлектроники

и особых материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

ipuzatykh@niime.ru

Теоретически описана схема фотонного генератора истинно случайных чисел (ФГСЧ), основанная на флуктуациях фазы лазерного излучения. При помощи компьютерного моделирования оценены оптимальные параметры пассивных элементов — волноводов (высота, ширина), изгибных волноводов (радиус кривизны, ширина), с точки зрения потерь интенсивности. Также, в целях поиска оптимальных параметров, был промоделирован мультимодовый интерферометр, являющийся составной частью ФГСЧ.

Ключевые слова: фотоника; криптография; истинно случайные числа; моделирование.

Введение

Генераторы случайных чисел (ГСЧ) имеют широкое применение, начиная от лотерей и заканчивая криптографией. Также ГСЧ применяются в вычислениях, где от качества случайной последовательности зависит качество получаемого результата [1]. Выделяют два вида ГСЧ: псевдослучайные и истинно случайные. Суть псевдослучайных генераторов состоит в том, что алгоритм их работы детерминирован и, вследствие чего, результат может быть предугадан. Истинно случайные генераторы, напротив, используют в основе своей работы принципы, обеспечивающие фундаментальную случайность, вследствие чего, выходную последовательность предугадать не представляется возможным. Также важным параметром работы ГСЧ, ввиду повышающихся требований к производительности устройств микроэлектроники [2], является скорость генерации случайной битовой последовательности. Количество вычислений, требуемых для получения точного ответа в методе Монте-Карло, экспоненциально растет с увеличением размерности задачи. Скорость генерации в фотонных генераторах достигает единицы и сотни Гбит/с [4, 5], в то время как в электронных генераторах скорость составляет сотни Мбит/с [3].

Принцип работы схемы

Представленная на рис. 1 схема ФГСЧ состоит из: лазера, фотодиодов, волноводов и интерферометров. Такты лазерного излучения со случайной фазой подаются в волновод. После они делятся при помощи мультимодового интерферометра. Далее половина излучения попадает в линию задержки. Длина линии задержки подбирается таким образом, чтобы время прохождения сигнала по ней соответствовало

одному такту лазера. Таким образом, когда по нижнему плечу в интерферометр приходит второй сигнал, по верхнему в этот момент приходит первый. В результате интерференции двух сигналов с разными фазами происходит преобразование интенсивности сигнала. Поскольку фаза излучения случайна, то и интенсивность каждого тактового сигнала является случайной величиной. Далее оптический сигнал попадает на фотодетектор, где происходит его преобразование в сигнал электрический и он подвергается дальнейшей обработке.

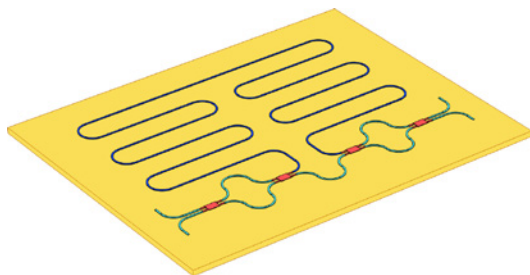


Рис. 1. Схема фотонного генератора истинно случайных чисел

В целях оптимизации потерь излучения при прохождении через пассивные (волноводы, изгибные волноводы) и активные (интерферометры) элементы схемы было проведено компьютерное моделирование. При моделировании волноводов варьировалась их ширина в диапазоне от 0,4 до 0,8 мкм с шагом в 0,05 мкм для набора из пяти стандартных технологических высот волновода: 150 нм, 170 нм, 200 нм, 220 нм и 250 нм. При моделировании изгибных волноводов варьировался радиус кривизны поворота в диапазоне от 4,5 до 5,5 мкм с шагом в 0,1 мкм для того же набора высот что и при моделировании волновода.

Заключение

Посредством компьютерного моделирования были установлены оптимальные параметры высоты и ширины волноводов, которые составили 220 нм и 0,55 мкм соответственно. Радиус кривизны поворотного волновода составил 5,5 мкм.

Литература

1. Herrero-Collantes, Miguel & Garcia-Escartin, Juan Carlos. (2016). Quantum Random Number Generators. *Reviews of Modern Physics*. 89.10.1103/RevModPhys.89.015004.
2. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС // *Микроэлектроника*, 2015. Т. 44. — № 3. — С. 180–201
3. Alibeigi Iman, Amirany Abdollah, Rajaei Ramin, Tabandeh Mahmoud, Shouraki Saeed. A Low-Cost and Highly Reliable Spintronics True Random Number Generator Circuit for Secure Cryptography // *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2019.
4. Li X., Cohen A. B., Murphy T. E. and Roy R. Scalable parallel physical random number generator based on superluminescent LED // *Opt. Lett.*, 2011. 36. P. 1020–1022.
5. Raffaelli F., Sibson P., Kennard J., Mahler D., Thompson M., Matthews J. A SOI Integrated Quantum Random Number Generator Based on Phase Fluctuations from a Laser Diode. 2018.

УДК 621.3.049.77, 004.415.2

Адаптация DRC и LVS правил для техпроцессов «тоньше» 110 нм под работу с открытыми инструментами

Елизаров С. Г., Лукьянченко Г. А., Уманский М. В., Черных Е. А.

ООО «Мальт Систем»

119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1

info@maltssystem.com

В докладе будет описан опыт адаптации правил DRC и LVS для техпроцессов «тоньше» 110 нм одной из азиатских фабрик. Сравнение результатов с коммерческими инструментами, анализ основных методик и трудностей, возникших при адаптации правил для открытых инструментов.

Ключевые слова: проектирование цифровых микросхем; открытое программное обеспечение; СБИС; DRC; LVS; KLayout.

В последние годы происходит активное развитие программного обеспечения (ПО) с открытым программным кодом для проектирования СБИС. К настоящему моменту открытый маршрут OpenLane (схема на рис. 1) достиг достаточного уровня зрелости для возможности разработки цифровых микросхем без использования проприетарного ПО [1]. Однако исходные данные для проектирования на конкретные технологические процессы (PDK, Process Development Kit) остаются проприетарными. PDK обычно распространяются вендорами со скриптами и другими компонентами рассчитанными на коммерческие инструменты. В первую очередь это касается исходных данных для проведения этапа Signoff, в т. ч. проверки правил проектирования (DRC) и проверки соответствия топологии и схемотехники (LVS).

На настоящий момент существует всего два полностью открытых PDK для OpenLane пригодных для производства микросхем: SkyWater 130 нм и Global Foundries 180 нм. Нами в прошлом году на конференции Микроэлектроника-2022 были представлены результаты по проверке OpenLane на закрытом коммерческом PDK 130 нм одной азиатской фабрики [2]. Данных же о применении OpenLane на более «тонкие» процессы (тоньше чем 130/110 нм) в открытом доступе крайне мало.

В настоящей работе мы представим результаты наших исследований применимости САПР с открытым исходным кодом для проведения DRC и LVS проверок на «тонкие» технологические процессы, а также расскажем про наработки по автоматизации адаптации правил предоставляемых фабрикой в скрипты для открытого САПР KLayout [3]. Также будут представлены примеры адаптации для KLayout некоторых DRC-правил для технологии 65 нм и результаты тестирования корректности и производительности проведения этих DRC-проверок средствами KLayout в различных режимах (flat, tiled, deep) с различным уровнем параллелизма.

Полученные нами результаты позволяют утверждать, что САПР с открытым исходным кодом KLayout предоставляет достаточный функционал и производительность для проведения DRC и LVS проверок при разработке реальных микросхем на технологии «тоньше» 110 нм.

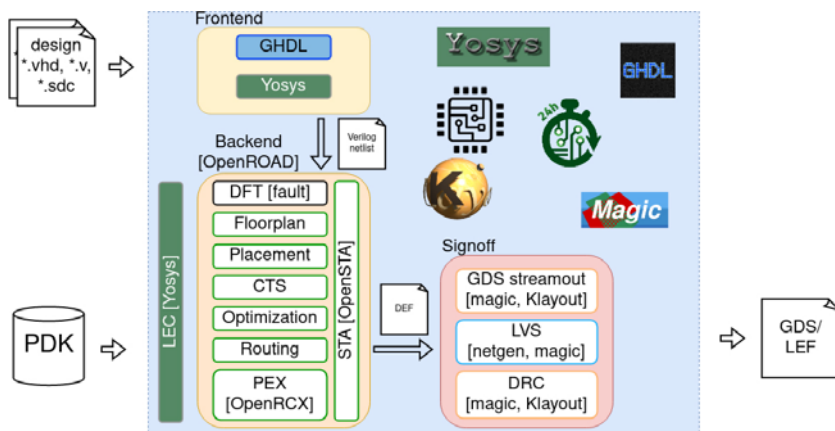


Рис. 1. Схема открытого маршрута проектирования СБИС OpenLane

Литература

1. Камкин А.С., Смоллов С.А., Чупилко М.М. Сравнение открытых маршрутов проектирования цифровой аппаратуры: qFlow, OpenLANE, Coriolis, SymbiFlow // Труды Института системного программирования РАН, 2021. — № 33 (6). — С. 111–130.
2. Монахов А.М. Открытые маршруты синтеза цифровых схем от RTL до GDS, состояние дел в отрасли и практические результаты // ООО «Мальт Систем», конференция Микроэлектроника 2022.
3. Проект KLayout [Электронный ресурс]. — URL: <https://klayout.org>.

УДК 621.382.323

Разработка модели НЕМТ на основе гетероэпитаксиальной структуры AlN/GaN для проектирования отечественных гетероструктурных СВЧ МИС

Рыжук Р. В., Неволина Т. Н., Каргин Н. И., Гусев А. С., Цунваза Д. М.
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
 115409, г. Москва, Каширское ш., 31
 rryzhuk@mephi.ru

Предложена параметрическая модель транзистора с длиной затвора 0,15 мкм на основе гетероэпитаксиальной структуры AlN/GaN для создания библиотеки элементов НИЯУ МИФИ. Показано, что модель транзистора на основе Angelov позволяет с большей точностью охарактеризовать прибор по сравнению с аналогичными моделями Fujii и EENEMT. Погрешность оценки не превышает 5% в диапазоне частот от 0,5 до 25,5 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ-транзистор; нитрид галлия; МИС; гетероструктура.

Введение

Приборы твердотельной электроники на основе нитридов III группы перспективны для применения в различных устройствах спутниковой связи, радарах, базовых станциях, включая технологии 5G [1], а также ряда силовых устройств для преобразовательной техники [2]. Использование монолитной технологии позволяет существенно повысить эффективность радиоэлектронных систем, значительно уменьшить массу и объемы аппаратуры, а также трудоемкость и себестоимость их изготовления. Важным элементом процесса проектирования устройств в виде монолитных интегральных схем (МИС) являются библиотеки элементов, которые интегрируются в САПР и позволяют осуществить моделирование и разработку топологии МИС для конкретной технологии изготовления. Библиотека элементов позволяет наиболее просто передать сведения о технологии как проектировщикам МИС внутри предприятия, так и сторонним организациям [3].

S-параметры и выходная характеристика НЕМТ

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) были изготовлены на основе гетероэпитаксиальных структур AlN/GaN с ультратонким барьером AlN [4] с использованием 0,15-мкм технологии НИЯУ МИФИ. Для экспериментальных исследований был использован стенд, состоящий из векторного анализатора цепей PNA-X, ручной зондовой станции PM8 и импульсного источника питания AMCAD PIV. Для измерения S-параметров и вольт-амперных характеристик использовалось программное обеспечение IVCAD. На рис. 1 представлены результаты экспериментальных и аналитических исследований S-параметров транзисторов.

Анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) и S-параметров транзистора производился на основе моделей Angelov, Fujii и EENEMT. Было установлено, что наибольшей схожимостью обладает модель НЕМТ на основе Angelov. Согласно указанной модели для описания тока стока $I_{сн}$ использовалось выражение

$$I_{сн} = I_{р0} [1 + \tanh(\Psi)] \cdot \tanh(\alpha U_{сн}) \cdot (1 + \lambda U_{сн}),$$

где $U_{\text{си}}$ — напряжение сток-исток; Ψ — функция степенного ряда, содержащего варьируемые параметры, в том числе λ ; I_{pko} — ток стока, при котором достигается максимум крутизны ВАХ [5].

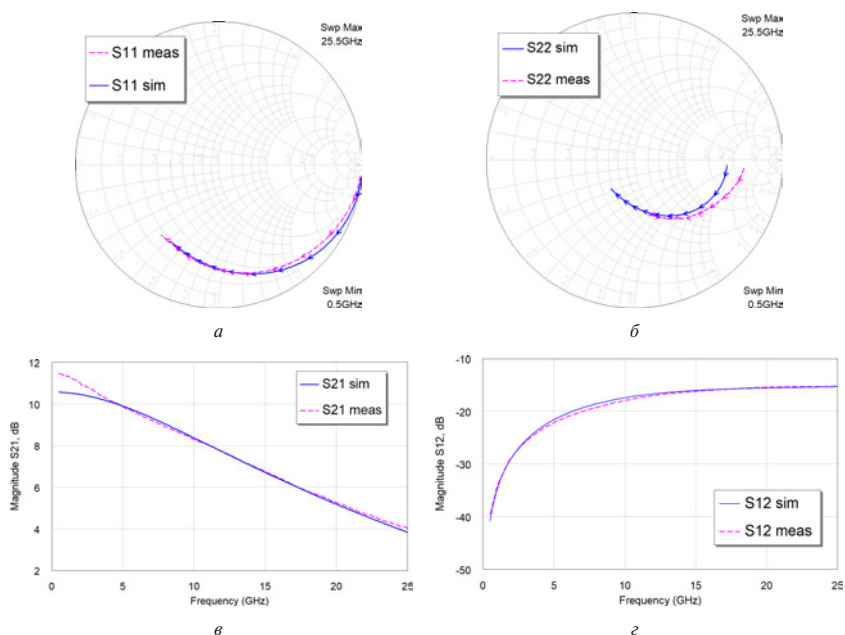


Рис. 1. S-параметры AlN/GaN НЕМТ в диапазоне частот 0,5–25,5 ГГц

Заключение

В результате проведенных исследований была предложена параметрическая модель НЕМТ на основе гетерозпитаксиальной структуры AlN/GaN, позволяющая охарактеризовать выходные характеристики транзистора с погрешностью менее 5% в диапазоне напряжения на стоке до 15 В и на затворе от -7 до 1 В, а также S-параметры в диапазоне частот от 0,5 до 25,5 ГГц. Полученная модель может быть использована при разработке СВЧ МИС на основе нитридов III группы.

Литература

1. Neining P. et al. Advances in GaN Devices and Circuits at Higher mm-Wave Frequencies // e-Prime — Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2023. Vol. 4. P. 1–16.
2. Teo K. H. et al. Emerging GaN technologies for power RF digital and quantum computing applications: Recent advances and prospects // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 16.
3. Сальников А. С. Автоматизация измерений, построение моделей и библиотек элементов СВЧ монолитных интегральных схем на базе отечественных GaAs и GaN-технологий. Дисс. канд. техн. наук. — Томск, 2014. — 274 с.

4. Гусев А. С. и др. Получение и исследование III-нитридных HEMT гетероструктур с ультратонким барьером AlN // 14-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 24–25 мая 2023 года. Сборник трудов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2023. — С. 29–30.
5. Sumit Emekar et al. Modified angelov model for an exploratory GaN-HEMT technology with short, few-fingered gates, 2017 // International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD).

УДК 005.89:002.5 + 001.7

Формирование базы знаний для расширенного параметрического синтеза изделий микроэлектроники

Колдаев И. М., Жаворонкин Ю. Г., Орлов В. О.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

igkoldaev@gmail.com

Рассматривается наполнение базы знаний декларативными и процедурными знаниями, включающими параметры микроэлектронных компонент, а также параметры информационных и измерительных систем и наблюдаемых объектов в разнообразных предметных областях.

Области внедрения проектируемых устройств определяется посредством применения процедурных знаний. Эта категория знаний включает алгоритмы, связывающие параметры сигнала с параметрами описания объекта в его предметной области. Эти процедуры отражают принцип измерения, связывающая обозначенные параметры посредством физических законов. Процедурные знания также определяют связь параметров сигнала с внутренними параметрами электронного устройства, это описывает выбираемый в ходе синтеза метод измерения.

Формализуемые декларативные знания отражают параметры, как объекта, так и устройства, как и параметры компонентной микроэлектронной базы устройства.

Формирование рассматриваемой баз знаний проводится в целях создания интеллектуальной информационной системы для проектирования электронных устройств с внедрением микроэлектронной компонентной базы.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная система; формализация знаний; микроэлектроника; внедрение устройств; проектирование устройств.

Введение

Разрабатываемую базу знаний расширенного параметрического синтеза /1, 2/, можно отнести к развитию интегрированных САПР, где компьютерное проектирование поднимается на новый уровень, включающий автоматизированного синтеза систем. При этом решаются задачи, формулируемые в разнообразных сферах применений технических устройств /3, 4/, вместе с тем, база знаний нацелена на продвижение микроэлектронных компонент в многочисленные сферы технической деятельности прикладных областей.

Описание

Формируемая база знаний включает три категории знаний: декларативные, процедурные и метазнания.

Декларативные знания являются информацией об микроэлектронных компонентах, описываются параметры устройств и технических систем на микроэлектронных компонентах. Кроме того, декларативные знания представляют и параметры из предметных областей возможного внедрения микроэлектронных компонент. Последняя категория параметров формируется в сотрудничестве со специалистами в областях применения технических устройств и систем.

Процедурные знания описывают взаимосвязь параметров разных уровней.

Так, параметры сигналов от объектов разнообразных предметных областей связываются с утвержденными в этих прикладных сферах параметрами объектов. Далее параметры сигналов сопоставляются с откликом на них первичного звена технического устройства. Этим описываются принципы измерения параметров предметных областей. Данные принципы отражают физические законы, лежащие в основе измерений. При этом физические законы и правила представляются в форме компьютерных алгоритмов, формирующих оболочку из процедурных знаний, взаимодействующих с декларативными знаниями.

В докладе рассматривается наполнение базы декларативными и процедурными знаниями.

Кроме того, процедурные знания определяют связь преобразуемого устройством сигнала от объекта с внутренними параметрами устройства. В том числе и параметрами микроэлектронных компонент технической системы. Эти действия отражают выбранный для применения метод измерения, реализуемый в данном устройстве.

В докладе рассматривается наполнение базы декларативными и процедурными знаниями. Также обсуждаются подходы к формированию метазнаний, предназначенных для управления другими знаниями в информационной интеллектуальной системе.

Заключение

Формируется база знаний с целью применений как в автоматизированном синтезе микроэлектронных и систем на их основе, так и для компьютерного исследования возможностей внедрения этих компонент в разнообразные отрасли технической деятельности. Таким образом, формируется интеллектуальная информационная система, как для проектирования, так и для внедрения микроэлектронных компонент, устройств и систем.

Литература

1. Колдаев И. М. Фундаментальный параметрический подход к синтезу электронных систем // *Наноиндустрия*, 2020. — № S96-1. — С. 265–269.
2. Колдаев И. М. Интеллектуальный доступ к данным, комплексно характеризующим объект и устройство оптического исследования. // *Научные труды XVI международной конференции «Информационные технологии в образовании»*. Сборник трудов участников конференции. Часть V. — М.: «БИТ про», 2006. — С. 164–166.
3. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // *Российские нанотехнологии*, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // *Электронная техника*. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–6
5. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // *Электронная техника*. Серия 3. Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.

УДК 004.231.3

Особенности современных подходов к верификации RISC-V ядер

Чусов С. А.

*Научно-исследовательская лаборатория
энергоэффективных Систем на Кристалле
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
chusserge@mail.ru*

Определены потенциальные сложности, с которыми может столкнуться инженер в процессе верификации процессорных ядер, в том числе на архитектуре RISC-V. Проанализированы современные подходы к верификации RISC-V ядер. Выделены их особенности, определена применимость для различных этапов проектирования.

Ключевые слова: функциональная верификация; симуляция; формальная верификация; RISC-V; процессор; обзор; анализ.

В настоящее время популярность набирает архитектура набора команд (АНК) RISC-V [1]. В 2015 году был создан международный фонд архитектуры. Уже с 2018 года он работает в партнерстве с The Linux Foundation. Основная отличительная черта архитектуры RISC-V — ее открытость. Так как АНК может быть использована бесплатно, то уже сейчас вокруг RISC-V сформировалось сообщество из десятков тысяч разработчиков, готовых к сотрудничеству и обмену опытом. Еще одной особенностью RISC-V является модульность. Базовый набор содержит 49 инструкций, при этом в спецификациях присутствует несколько десятков расширений для аппаратной поддержки дополнительного функционала. Также инженерам предоставлена возможность создания нестандартных команд и их интеграция в архитектуру.

Основным цифровым блоком систем на кристалле в большинстве случаев является процессор, выполняющий программную обработку цифровых данных. Сфера верификации процессорных ядер является одной из самых актуальных составляющих индустрии проектирования и верификации сложно-функциональных блоков. В ходе работы были определены сложности, с которыми может столкнуться инженер в ходе функциональной верификации процессорных ядер. Неполный список включает себя проверку всех реализуемых ядром инструкций, проверку их сочетаний, приводящих к микроархитектурным конфликтам, проверку уровня доступа к архитектурным регистрам, проверку корректности обработки синхронных и асинхронных событий. В том числе было разобрано влияние модульности RISC-V на процесс функциональной верификации ядер на основе этой АНК.

Был проведен анализ современных подходов к функциональной верификации RISC-V ядер, где каждый подход реализует один из типов верификации: формальный или же на основе симуляции. Были определены области применимости каждого из типов, а также конкретных подходов каждого типа. Так, к примеру, формальная верификация не может быть использована для проверки асинхронных событий, а тестирование при помощи симуляции с самопроверкой не является

достаточным, однако его использование оправдано на начальных этапах проектирования. В ходе работы были подробно рассмотрены несколько уровней функциональной верификации на основе симуляции, отличающихся сложностью и охватом проверяемого функционала. Сюда, прежде всего, вошли тестирование с самопроверкой и различные подходы, использующие сравнение с эталонной моделью.

В ходе работы проанализированы современные интерфейсы для верификации RISC-V ядер, такие как RVFI [2] и RVVI [3] и определены причины, по которым возникла необходимость в их создании и использовании. Также были определены преимущества данных интерфейсов и представлены примеры их использования в различных подходах к верификации.

В заключение автором была дана субъективная оценка текущего состояния области верификации RISC-V ядер и вектора ее развития.

Литература

1. RISC-V: Open standard Instruction Set Architecture (ISA) [Электронный ресурс] // URL: <https://riscv.org/about> (дата обращения: 10.09.23).
2. Интерфейс RVFI [Электронный ресурс] // URL: <https://github.com/SymbioticEDA/riscv-formal/blob/master/docs/rvfi.md> (дата обращения: 10.09.23).
3. Интерфейс RVVI [Электронный ресурс] // URL: <https://github.com/SymbioticEDA/riscv-formal/blob/master/docs/rvvi.md> (дата обращения: 10.09.23).

УДК 621.382

Современные методы тестирования ПЛИС

Горчакова М. А.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

example@gmail.com

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрены актуальные методы тестирования ПЛИС, такие как: выявление сбоя, связанного с нарушением задержек во время работы ПЛИС, метод с использованием тестовых стендов, метод тестирования логических блоков ПЛИС с использованием активной репликации, метод мониторинга тестовых векторов для обнаружения сбоев во время работы ПЛИС, метод тестирования с использованием конвейеризированных генераторов контрольных кодов.

Ключевые слова: ПЛИС; тестирование; активная репликация; тестовые вектора; конвейеризированные генераторы кодов.

Введение

С ростом степени интеграции микросхем обеспечение стабильности и воспроизводимости их параметров имеет решающее значение [1]. Помимо этого, становится все труднее найти баланс между важными параметрами микросхемы, таких как: высокая производительность, стоимость, время проектирования и тестирования, а также обеспечение надлежащих требований к надежности и стойкости ко внешним воздействующим факторам. Исходя из этого, наиболее актуальные задачи в области микроэлектроники так или иначе связаны с поиском наиболее эффективных методов снижения времени проектирования и тестирования микросхем и обеспечения выхода максимального количества годных устройств. Снижение времени проектирования микросхем осуществляется путем приближения к полной автоматизации при сборке проектов, на основе заранее спроектированных библиотек стандартных элементов и сложно-функциональных блоков (СФ-блоков). Тем не менее, для обеспечения максимальной эффективности и надлежащей надежности при автоматизации маршрута изготовления микросхем, необходимы соответствующие подходы к их тестированию.

Метод выявления сбоя при нарушении задержек во время работы ПЛИС

Основная проблема в использовании ПЛИС связана с тем, что производитель ПЛИС не может протестировать каждую микросхему с индивидуальными настройками под проект [2]. Тестирование только используемой части схемы также может быть некорректным, так как новые неисправности с одинаковой вероятностью могут возникнуть как в резервных ресурсах ПЛИС, так и в неиспользуемой в данный момент части рабочей схемы. Проверка динамических характеристик ПЛИС на основе использования метода BIST, рассмотрена в статье [2]. Данный метод особенно актуален для ПЛИС, так как в отличие от ASIC, в которых BIST-система занимает большую часть микросхемы, в ПЛИС она чаще всего уже реализована производителем. Разработка данной системы заключается в реализации

двух абсолютно одинаковых логических цепочек за исключением их расположения в самой ПЛИС (одинаковые программируемые логические блоки и межсоединения между ними). Таким образом, задержки распространения будут примерно одинаковыми при отсутствии отказов. Основная идея данного метода заключается в сравнении задержек тестируемых путей.

Метод с использованием тестовых стендов

Проверка покрытия тестом во время окончательного тестирования платы затруднительна и в большинстве случаев неосуществима. Для проверки требований моделирования недостаточно, и во многих случаях оно не может выявить ошибки, которые могут повлиять на безопасность и надежность тестируемого устройства. В качестве решения данной проблемы, тестовые стенды дополняют тестирование на уровне платы, чтобы увеличить охват проверки тестами. Тестовый стенд обеспечивает 100-процентное покрытие проверкой тестами со 100-процентным входным контролем ПЛИС, необходимым для реализации сценариев тестирования на основе требований и надежности. Тестовые стенды используют те же тестовые примеры и тестовые воздействия, которые реализованы в моделировании для тестирования устройств, что предлагает более эффективный подход к проверке и возможность сократить цикл проверки [3].

Метод тестирования логических блоков ПЛИС с использованием активной репликации

В статье [4] предлагается метод для онлайн тестирования задействованных ячеек ПЛИС и офлайн тестирования незадействованных частей. При возникновении ошибки или отказа в тестируемой ячейке, ее конфигурация копируется в ближайшую незадействованную ячейку, далее происходит перекоммутация и подсоединение скопированной ячейки вместо ячейки с ошибкой.

Метод мониторинга тестовых векторов для обнаружения сбоя

В статье [5] предложен метод обнаружения одиночных отказов в коммутациях и в логических ячейках. Основная цель данного метода — это точное определение места отказа и нивелирование данного сбоя с помощью существующих ресурсов.

Данное тестирование происходит онлайн с подачей специальных тестовых векторов. Проверка межсоединений осуществляется путем попарной передачи одинаковых или инверсных пар на прямой и инверсный входы соответственно. В том случае, когда значения отличаются от ожидаемых, предполагается сбой коммутационной сети.

Метод тестирования ПЛИС с использованием конвейеризированных генераторов контрольных кодов

В статье [7] представлен метод тестирования ПЛИС на ранних этапах разработки с помощью создания универсальных тестовых прошивок с конвейеризированных генераторов контрольных кодов. Типы тестовых прошивок разрабатываются на основе CRC (для выявления сбоев и отказов) и на основе кода Хэмминга (для выявления места сбоя).

Заключение

Были рассмотрены наиболее актуальные методы тестирования ПЛИС. Методы направлены на выявление сбоев, возникающих в самой архитектуре, и сбоев при работе финального проекта с защитой прошивкой ПЛИС.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
2. Abramovici M., Stroud C. E. BIST-Based Delay-Fault Testing in FPGAs // Journal of Electronic Testing, 2003. Vol. 19. P. 549–558.
3. Tool Qualification and Assessment Process Guidance for Active-HDL Code Coverage. Revision 1.4. 2010. Aldec, inc.
4. Gericota M. G., Alves G. R., Silva M. L., Ferreira J. M. On-line Testing of FPGA Logic Blocks Using Active Replication // Norwegian Computer Science Conference (NIK'02), Kongsberg, Norway, November 2002.
5. Mehdi Baradaran Tahoori. Application-Dependent Diagnosis of FPGAs, Proceeding of 2004 International Conference on Test, 2004.
6. Брехов О. М., Ратников М. О. Тестирование ПЛИС с помощью конвейеризированных генераторов контрольных кодов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. — Вып. 11. — URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1005.html>.

УДК 621.3.049.77

Быстродействующий ступенчатый аналого-цифровой преобразователь с цифровой коррекцией

Кочетков Д. В., Паташев П. А., Белоусов Е. О., Эннс А. В., Максимов А. К., Моленкамп К. М.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

dkochetkov@niime.ru, ppatashev@niime.ru, ebelousov@niime.ru, aenns@niime.ru, amaksimov@niime.ru, kmolenkamp@niime.ru

Разработана полностью новая схема с применением архитектуры полупараллельного (semiflash) АЦП с перемежением. АЦП состоит из двух ядер АЦП, каждое из которых последовательно в два этапа производит грубую и точную оцифровку входного сигнала. Применяется метод цифровой коррекции с избыточностью для компенсации смещения нуля компараторов и выпадения кодов на границах диапазонов преобразования.

Ключевые слова: АЦП; интегральная нелинейность; дифференциальная нелинейность; цифровая коррекция; смещение нуля.

Введение

В настоящее время получили широкое применение параллельные АЦП для обеспечения высокого быстродействия [1]. Основной недостаток таких АЦП связан с тем, что с увеличением количества разрядов, количество компараторов увеличивается экспоненциально. Для уменьшения количества компараторов обычно используют двухступенчатые (semiflash). В следствие чего схема занимает меньшую площадь, уменьшается потребляемая мощность и уменьшается входная емкостная нагрузка, что позволяет производить обработку сигнала с более высокой частотой.

Структурная схема разработанного АЦП

На рис. 1 показана структурная схема разработанного АЦП.

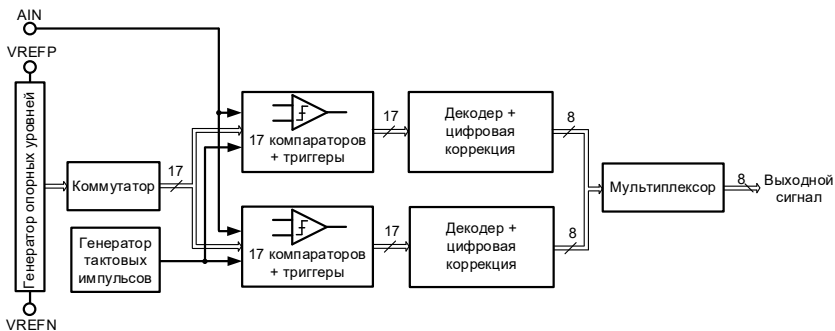


Рис. 1. Структурная схема разработанного АЦП

АЦП содержит два 8-битных ядра, работающих попеременно, оба ядра используют общие опорные уровни, формируемые резистивным делителем. Каждое

из ядер работает по принципу semiflash: преобразование происходит в два этапа, сначала грубое, потом точное [2, 3, 4].

В ходе грубого преобразования 17 компараторов производят сравнение входного сигнала с 17 уровнями, равномерно распределенными по всей шкале преобразования. На основании результата грубого преобразования, к тем же 17 компараторам коммутируются 17 точных уровней с резистивного делителя. Декодер преобразует термометрический код в one-hot код, а затем сразу в двоичный вид, а также производит суммирование грубого и точного кодов вместе с цифровой коррекцией.

Принцип цифровой коррекции

В каждом ядре используется на два компаратора больше, чем требуется для 8-битного преобразования. Это позволяет компенсировать возможную пропажу кода, при наличии смещения нуля у компараторов. Это смещение нуля может привести к выходу остатка от преобразования первой ступени за границы верхнего или нижнего опорных напряжений, что приводит к пропускам кода в выходной передаточной характеристике. За счет применения двух избыточных компараторов на вход второй ступени подается только 15/17 полного диапазона напряжения, таким образом, некоторое смещение остатка от преобразования первой ступени не приведет к пропаже кодов [5].

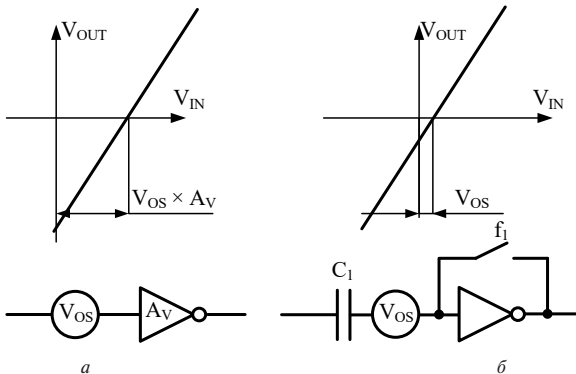


Рис. 2. Влияние смещения нуля на передаточную характеристику усилителя (а), принцип автообнуления компараторов (б)

Принцип автообнуления компараторов

Нелинейность АЦП может быть сильно ухудшена в результате смещения точек срабатывания компараторов от действия их смещения нуля, особенно это влияет при выполнении «точного» преобразования. Передаточная характеристика усилительного каскада с приведенным к входу смещением V_{OS} показана на рис. 2а. Для компенсации смещения нуля применяется автообнуление каждого усилительного каскада компаратора. На рис. 2б показан используемый принцип автообнуления компараторов [6]. В фазе обнуления, при которой замыкается ключ f_1 , усилитель включается в режим с обратной связью, и на его выходе устанавливается некоторый режимный потенциал, зависящий от соотношения размеров транзисторов

в инверторе, плюс приведенное к входу смещение V_{OS} , полученное напряжение сохраняется на конденсаторе C_1 . В фазе усиления выходное напряжение будет изменяться относительно сохраненного в предыдущей фазе на C_1 напряжения, в которое уже включено V_{OS} , таким образом выходное смещение нуля уменьшается в коэффициент усиления A_v раз, по сравнению со схемой без автообнуления.

Заключение

Разработанная схема АЦП позволяет снизить ток потребления до 60 мА за счет использования всего 34 компараторов. Все компараторы работают по схеме с автообнулением при каждом такте преобразования, что делает ненужным применение калибровки компараторов. ENOB = 7,6 бит при 200 МВывороч/с. INL полной шкалы 0,7 МЗР.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5. EDN JXZUBV.
2. Cremonesi A., Maloberti F., Torelli G. and Vacchi C. An 8-bit two-step flash A/D converter for video applications // Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 1989.
3. Hosotani S., Miki T., Maeda A. and Yazawa N. An 8-bit 20-MS/s CMOS A/D converter with 50-mW power consumption // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1990. Vol. 25. № 1. P. 167–172.
4. Lewis S. H., Fetterman H. S., Gross G. F., Ramachandran R. and Viswanathan T. R. A 10-b 20-Msample/s analog-to-digital converter // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992. Vol. 27. № 3. P. 351–358.
5. Razavi B. and Wooley B. A. Design techniques for high-speed, high-resolution comparators // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992. Vol. 27. № 12. P. 1916–1926.
6. ADC08B200 / ADC08B200Q 8-Bit, 200 MSPS A/D Converter with Capture Buffer — Datasheet.

УДК 004.42

Разработка симулятора перспективного отечественного криптографического микроконтроллера на базе архитектуры RISC-V

Гусаров А. А.^{1,2}, Буканов Е. А.¹

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
gusarov2906@gmail.com

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан симулятор, главной целью которого является повышение скорости выполнения и упрощение процесса отладки программ под новую линейку микроконтроллеров для смарт-карт. Рассмотрены технические моменты реализации симулятора, включающие структуру, нюансы разработки и примененные методики оптимизации.

Ключевые слова: симуляция микроконтроллера; структура симулятора; смарт-карты; оптимизация; отладка; архитектура RISC-V.

Введение

В АО «НИИМЭ» ведется разработка новой линейки 32-битных микроконтроллеров NE32 на базе архитектуры LHD RISC-V для смарт-карт. Специфика микроконтроллеров для смарт-карт подразумевает запись программы в ПЗУ. Отладка программ перед зашивкой на реальный микроконтроллер является необходимой процедурой из-за невозможности изменения программы после прошивки [1]. Поэтому для отладки программ под микроконтроллеры для смарт-карт используются аппаратные эмуляторы или программные симуляторы. Для разработки программ под NE32 был создан SDK, состоящее из аппаратного эмулятора на FPGA, программного симулятора LHD RISC-V и плагина для среды разработки Eclipse, упрощающего отладку программ для микроконтроллера. LHD RISC-V также содержит в себе отладчик, который помогает обнаружить и исправить ошибки, изучить работу программы и оптимизировать ее производительность. Наличие симулятора в составе SDK является необходимым, так как LHD RISC-V позволит упростить процесс отладки и повысить быстродействие программ по сравнению с аппаратным эмулятором.

Подробности технического устройства симулятора

При разработке LHD RISC-V было принято решение выделить симулятор и отладчик в разные модули для возможного расширения поддержки симулятором других отладчиков и использования отладчика с другими симуляторами. Структурная схема LHD RISC-V представлена на рис. 1. Симулятор содержит в себе ядро, контроллеры памяти и прерываний, таймер и периферийные устройства и выполняет роль исполнителя кода поступающей на вход программы. Еще одной важной частью симулятора является система логирования, позволяющая вести системный, отладочный и транспортный лог и имеющая гибкую систему фильтрации логов. Внутри отладчика LHD RISC-V реализована ответная сторона для протокола gdb/mi позволяющая использовать GDB для отладки симулятора [2]. В качестве среды разработки программ под микроконтроллер можно использовать Eclipse. Для упрощения процесса отладки и также

расширения ее возможностей был разработан плагин под Eclipse, включающий в себя набор специально разработанных окон для управления симулятором и отображения состояния сопроцессоров симметричной и ассиметричной криптографии.

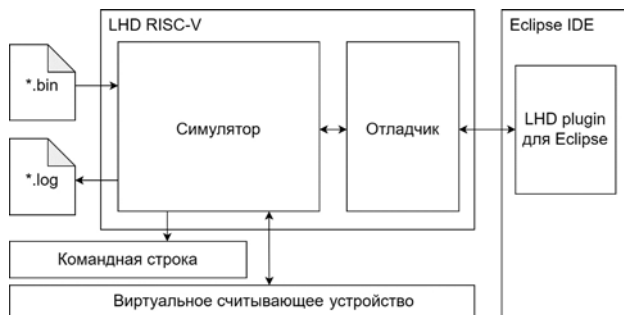


Рис. 1. Структурная схема работы LHD RISC-V

Ускорение выполнения программ на симуляторе достигается в первую очередь за счет выполнения программы на мощностях ПК. Однако для большего повышения быстродействия также были применены различные приемы. Так была применена оптимизация с использованием «теневого памяти» для функций блока MMU, который проверяет привилегии области памяти при работе с ней, за счет чего сложность поиска правила блоком была снижена с линейной до константной.

Формат команд RISC-V имеет несколько типов, каждый из которых по-разному разбирается [3]. Поэтому еще одной значимой оптимизацией является декодирования команд RISC-V посредством преобразования кода в ПЗУ во внутреннее представление. Эта оптимизация принесла прирост в быстродействии за счет сокращения времени на разбор команд на лету, подготавливая все команды еще в момент загрузки программы в ПЗУ.

Примененные на симуляторе оптимизации дали прирост в скорости выполнения программ в три раза по сравнению с симулятором без их применения и более чем в десять раз по сравнению с аппаратным эмулятором.

Заключение

Разработанный симулятор LHD RISC-V функционально соответствует микроконтроллеру из линейки NE32 и включен в состав SDK под этот микроконтроллер. Для удобства отладки был использован популярный протокол gdb/mi и разработан плагин для среды разработки Eclipse. Был проведен ряд оптимизаций, в результате которых скорость работы программ на симуляторе соответствует ожидаемой.

Литература

1. Мытник К. Я., Панасенко С. П. Смарт-карты и информационная безопасность. — ДМК Пресс, 2019. — С. 30–31.
2. Richard M. S., Roland P., Stan S. Debugging with GDB: The GNU Source-Level Debugger. GNU Press, 2002. P. 567–568.
3. Andrew W., Krste A. The RISC-V Instruction Set Manual. Volume I: Unprivileged ISA. RISC-V Foundation, 2019. P. 15–17.

УДК 621.3.049.77

Интеграция A^3B^5 кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа

Ефимов А. С., Рудина А. Д., Воронин А. А., Темнов А. М., Дудинов К. В.,
Груша А. В., Курочка А. С.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

easmov@gmail.com

Представлен подход интеграции A^3B^5 кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа. Подход включает конструкции бескорпусной гибридно-монокристаллической интегральной схемы и для поверхностного монтажа, описаны их конструкции. Процесс интеграции совместим с существующими полупроводниковыми технологиями изготовления A^3B^5 кристаллов.

Ключевые слова: гетерогенная интеграция; монокристаллическая интегральная схема; гибридно-монокристаллическая интегральная схема; СВЧ; широкозонные полупроводники; перевернутый монтаж; поверхностный монтаж; Au-Sn.

Введение

Требования к электронной компонентной базе (ЭКБ) СВЧ ускоренно растут не только с точки зрения электрических характеристик. Также актуальными задачами являются: повышение функциональности, снижение массогабаритных характеристик и стоимости изделий. Для достижения совокупно высоких характеристик требуется применение комбинации приборов, реализованных на разных полупроводниковых технологиях — гетерогенной интеграции. В данной работе представлен подход к интеграции кристаллов A^3B^5 с применением метода перевернутого монтажа, обеспечивающего высокие электрические характеристики в миллиметровом диапазоне частот и локальность межсоединений с минимальным шагом до 6 мкм.

Подход интеграции A^3B^5 кристаллов СВЧ методом перевернутого монтажа

Повышение одновременно электрических параметров, функциональности и снижения себестоимости приборов актуализирует концепцию построения гибридно-монокристаллических схем (ГМИС) СВЧ: интеграция отдельных готовых кристаллов активных элементов (транзисторов и МИС СВЧ) с кристаллами и платами пассивных элементов. Интеграция кристаллов методом перевернутого монтажа является перспективным подходом для применения в миллиметровом диапазоне. Использование технологии монтажа методом взаимной переходной диффузии Au-Sn обеспечивает локальность соединения с минимальным шагом до 6 мкм, что позволяет реализовать интеграцию кристаллов методом перевернутого монтажа близкую к монокристаллической [1]. Схематичное представление концепции проиллюстрировано на рис. 1.

На рис. 2 отображено схематичное представление конструкций ГМИС СВЧ с применением метода перевернутого монтажа. Бескорпусная конструкция содержит диэлектрическую подложку, где на лицевой стороне формируют пассивные элементы и контактные площадки для соединения кристалла активного элемента. Контактные площадки для соединения кристалла активного элемента выполнены

из системы металлов Au-Sn общей толщиной 5 мкм. Кристалл активного элемента соединяется с контактными площадками диэлектрической подложки посредством сформированной системы Au-Sn, обеспечивая надежный монтаж [2].

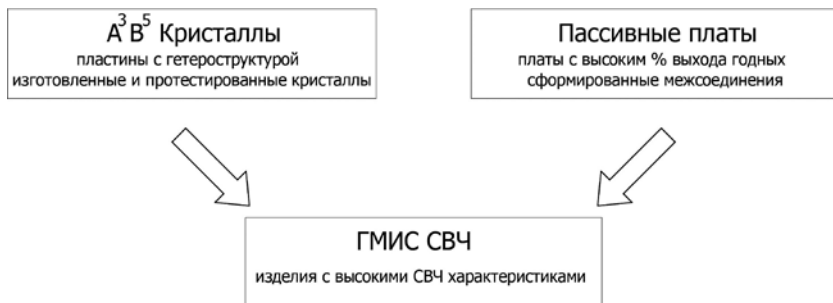


Рис. 1. Концепция ГМИС СВЧ с применением перевернутого монтажа

Конструкция ГМИС СВЧ для поверхностного монтажа включает диэлектрическую подложку, на лицевой стороне которой реализованы все пассивные элементы схемы, а на обратной — контактные площадки питания и сигнальные выходы. Электрическое соединение лицевой и обратной сторон обеспечено сквозными металлизированными отверстиями. Обратная же сторона активного элемента соединяется с углублением крышки. Крышка соединяется с диэлектрической подложкой посредством ранее упомянутого соединяющего слоя, обеспечивая герметичность схемы.

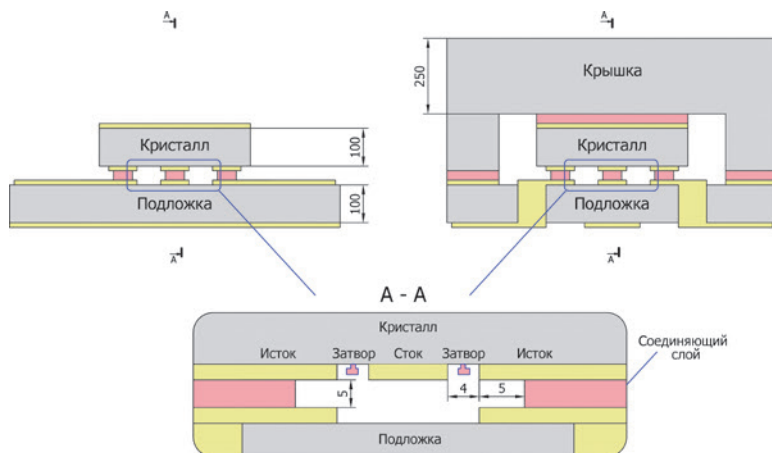


Рис. 2. Подход интеграции кристаллов A^3B^5 методом перевернутого монтажа бескорпусной конструкции (слева) и для поверхностного монтажа (справа)

Габаритные размеры межсоединения обеспечивают вносимые потери менее 0,1 дБ в диапазоне до 50 ГГц, с высокой повторяемостью [2]. Высокая степень локальности межсоединений обеспечивает тепловой режим работы сопоставимый с интеграцией кристалла обратной стороной на теплоотвод [3].

Заключение

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» ведутся работы по развитию процессов гетерогенной интеграции с применением перевернутого монтажа и системы металлов Au-Sn как соединяющего слоя. Представленный подход интеграции A^3B^5 кристаллов методом перевернутого монтажа открывает новые возможности для ГМИС СВЧ миллиметрового диапазона длин волн.

Литература

1. Ефимов А. С., Темнов А. М., Зайцев А. А. и др. Система Au-Sn для монтажа кристаллов на пластине в микроэлектронике СВЧ методом взаимной переходной диффузии // Нано- и микросистемная техника, 2023. — Т. 25. — № 4. — С. 171–180.
2. Efimov A. S. et al. Flip-Chip Integration of III-V Chips on Wafer for mmW Applications // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). IEEE, 2022. P. 220–222.
3. Ефимов А. С., Груша А. В., Чибирев Р. А. Исследование тепловых характеристик беспроводной интеграции мощных СВЧ кристаллов // Журнал радиоэлектроники, 2023. — № 7.

УДК 621.3.049.77

Разработка настраиваемого широкополосного СМЛ передатчика для использования в устройстве сериализации/десериализации данных

Паташев П. А., Белоусов Е. О., Кочетков Д. В., Эннс А. В., Максимов А. К., Моленкамп К. М.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

ppatashev@niime.ru, ebelousov@niime.ru, dkochetkov@niime.ru, aenns@niime.ru,

amaksimov@niime.ru, kmolenkamp@niime.ru

Разработан СМЛ передатчик данных с полосой передачи данных от 100 МТ/с (мегатранзакций в секунду) до 2,8 ГТ/с и коэффициентом битовых ошибок менее 10^{-12} . Для улучшения характеристик передаваемого сигнала введена настройка системы ФАПЧ, СМЛ логики сериалайзера и устройства предвыскажений сигнала.

Ключевые слова: СМЛ передатчик; сериалайзер/десериалайзер; система ФАПЧ; коэффициент битовых ошибок; предвыскажения сигнала.

Введение

В современных вычислительных комплексах широкое распространение получили системы сериализации/десериализации данных. Такие системы осуществляют передачу параллельных данных по высокоскоростным линиям, объединяя до 256 входных шин в пару дифференциальных проводников [1]. При этом скорости передачи данных достигают 80 ГТ/с [2]. Полоса частот доступных для передачи данных обычно ограничена конструктивными особенностями сериалайзера, что затрудняет его использование в более медленных интерфейсах [3]. В данном докладе представлена разработка настраиваемого передатчика с возможностью изменения полосы частот передаваемых данных, передатчик выполнен по технологии 90 нм кремний на изоляторе [4].

Структурная схема разработанного передатчика

На рис. 1 показана структурная схема разработанного передатчика.

Предложенный передатчик работает по следующему алгоритму:

1. Система ФАПЧ формирует сетку частот: входная частота, умноженная на 5 с уровнем КМОП, умноженная на 5 с уровнем СМЛ, умноженная на 10 с уровнем СМЛ.
2. Система цифровой обработки (СЦО) формирует 4 параллельных шины входных данных для передатчика. Данные предоставляются в кодировке 8b/10b.
3. Аналоговый сериалайзер формирует поток выходных данных и поток данных для предвыскажений со скоростью передачи в 20 раз превышающей входную частоту.
4. Драйвер поддерживает необходимый ток дифференциальных выходов устройства, драйвер обладает функцией управления мощностью предвыскажений.

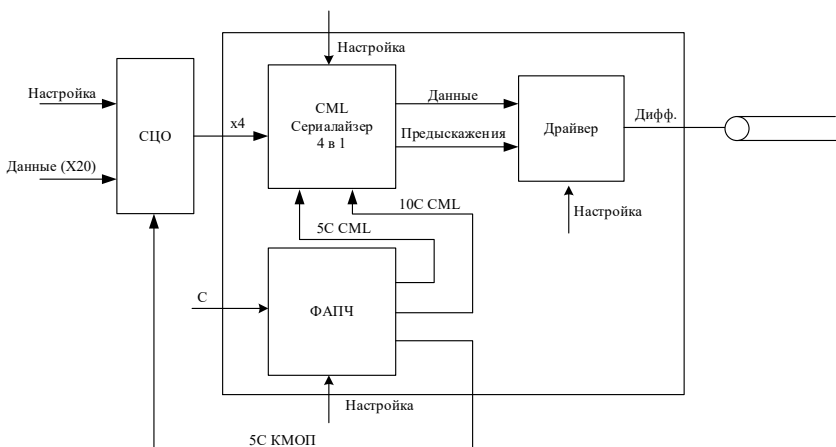


Рис. 1. Структурная схема разработанного передатчика

Управление полосой частот передаваемых данных

Практическая скорость передачи данных ограничена возможностями технологии КНИ 90 нм. ЦО способна работать частоте не более 700 МГц, таким образом предельная скорость передачи данных составляет 2,8 ГТ/с. Для такой скорости передачи данных устройство ФАПЧ должно обеспечивать частоту в 1,4 ГГц. Натуральная частота системы ФАПЧ определяется формулой 1.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{PD} \cdot K_{VCO}}{N \cdot C_1}}, \quad (1)$$

K_{PD} — переходная функция фазового детектора, K_{VCO} — переходная функция генератора частоты, N — коэффициент умножения системы ФАПЧ, C_1 — емкость, входящая в фильтр нижних частот.

При установлении натуральной частоты в 1/20 от входной частоты достигаются лучшие показатели стабильности системы и меньшие величины случайного джиттера. Для этого требуется ограничение усиления генератора частоты, что приводит к уменьшению полосы частот передачи данных. Предложенная схема настройки системы ФАПЧ позволяет осуществлять передачу данных на частотах от 100 МТ/с до 2,8 МТ/с. Настройка заключается в изменении токов ядра генератора и переключении фильтров нижних частот в системе ФАПЧ.

При изменении частоты системы ФАПЧ возникают искажения в работе СМЛ логики, что приводит к увеличению коэффициента битовых ошибок, для устранения искажений введена настройка током аналогового сериалайзера 4 в 1.

Для улучшения характеристик передаваемого сигнала введена возможность предсказаний сигнала. Предсказания заключаются в формировании ослабленного сигнала через такт после переключения и добавления его к основному сигналу. Таким образом переключение данных осуществляются при максимальной мощности передатчика, а поддержание предыдущего уровня — на ослабленной

мощности, что позволяют увеличить уровень сигнала в первый такт после переключения.

Заключение

Разработанный CML передатчик для использования в устройстве сериализации/десериализации данных обеспечивает передачу данных на скоростях от 100 МТ/с до 2,8 ГТ/с с коэффициентом битовых ошибок не более 10^{-12} . Широкая полоса передаваемых данных обеспечивается настройкой тока ядра и выбором фильтра нижних частот системы ФАПЧ. Стабильность передачи данных достигается за счет управления током CML сериалайзера 4 в 1 и настройки предискажений передаваемого сигнала.

Литература

1. PCI Express Base Specification Revision 5.0. — PCI-SIG — 22 May 2019.
2. Universal Serial Bus 4 Specification — Apple Inc., Hewlett-Packard Inc., and etc. — August 2019.
3. Han S., Kim T. et al. A 10 Gbps SerDes for wireless chip-to-chip communication // 2015 International SoC Design Conference (ISOCC), Gyeongju, Korea (South) — 11 February 2016.
4. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанозлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5. EDN JXZUBV.

УДК 621.3.049.774, ББК 32.853.1

Разработка интегрального КМОП 180 нм приемника гидроакустических сигналов

Вертегел В. В., Ветров И. Л., Манько А. С., Зеленкевич Д. Ю., Смаилов С. Ф.,
Кожемякин В. С.

Инжиниринговый центр изделий микро- и нанoeлектроники СевГУ
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
asmanko@sevsu.ru

Представлены результаты разработки топологии интегральной схемы приемника гидроакустических сигналов в диапазоне частот до 200 кГц на основе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Приемник предназначен для применения в системах подводной звуковой связи и локации.

Ключевые слова: гидроакустика; приемник; КМОП; гидролокация.

Разработана топология ИС приемника (рис. 1) на основе отечественной КМОП-технологии 180 нм фабрики АО «Микрон». Приемник позволяет перекрыть широкий частотный диапазон гидроакустических приложений связи и локации и потребляет не более 7 мА.



Рис. 1. Структурная схема канала приемника

В приемнике реализованы два вида обработки принимаемого сигнала с преобразованием в 12-разрядный цифровой код: преобразование в режиме прямого усиления и преобразование с квадратурной обработкой. Для реализации квадратурной обработки применены формирователь квадратурных сигналов (ФКС) и два балансных смесителя.

Выбор вида обработки осуществляют через цифровой блок управления (ЦБУ) программным путем по интерфейсу SPI. Приемник позволяет запрограммировать

коэффициент передачи программируемого усилителя (ПрУ) в диапазоне от -31 до 64 дБ с шагом 1 дБ и частоту среза фильтра нижних частот (ФНЧ) 5-го порядка в пределах $3,1$ – 200 кГц с шагом около 3 кГц.

Преобразование в двоичный код осуществляет 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) последовательного приближения. Время преобразования АЦП зависит от тактовой частоты и при $F_{clk} = 25$ МГц не превышает 1 мкс.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: разработанная топология ИС содержит основные функциональные узлы приемника, что позволяет уменьшить его размеры и энергопотребление, а также может служить основой для построения однокристалльных многоканальных приемников гидроакустических сигналов.

УДК 538.91

Маршрут процесса верификации при проектировании современных технологических библиотек

Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.

АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

knasibullin@niime.ru

Степень интеграции современных СБИС растет экспоненциально. С переходом к технологическим нормам 0,25 мкм и ниже разработчик СБИС при создании сколь угодно сложных систем уже практически не ощущает недостатка в транзисторах на кристалле. На первый план выходит другой сдерживающий фактор — проблема верификации комплектов технологического проектирования

ния

Ключевые слова: СБИС; PDK; верификация; технологические библиотеки; маршрут верификации.

Введение

Возможности средств верификации сегодня заметно отстают от возможностей систем проектирования, не говоря уже о технологических достижениях полупроводникового производства [1]. В то же время затраты на создание комплекта фототаблиц для субмикронных СБИС настолько высоки, что их повторное изготовление из-за обнаруженных ошибок зачастую недопустимо как с точки зрения задержки выхода изделия на рынок, так и в связи с ростом его конечной стоимости. Одновременно усложняется и процесс поиска причины обнаруженной тестом неисправности.

Комплект средств проектирования (PDK) — структура, особенности и маршрут процесса верификации

Комплект средств проектирования (PDK, Process Design Kit) является частью конструкторско-технологической платформы проектирования ИС. Помимо PDK для разработки необходимы: маршрут проектирования для аналоговых, цифроаналоговых и цифровых СБИС, поддержка САПР на всем маршруте проектирования, средстве модели и комплект средств проектирования для цифровых схем (DDK). В состав PDK входят набор библиотек, командных файлов для проведения физической верификации топологии ИС (DRC/LVS/PERC), экстракции паразитных параметров (PEX), SPICE-модели и описание технологического процесса, интегрированного в среду проектирования.

PDK выполняет следующие основные функции:

1. Обеспечивает базис для разработки и тестирования ИС.
2. Предоставляет разработчику маршрут проектирования и примеры проектов.
3. Обеспечивает технической поддержкой при разработке.
4. Улучшает тестопригодность инженерных решений в проекте и предсказуемость процесса разработки.
5. Предоставляет инженерам доступ к консультативной базе по вопросам проектирования, использования САПР, PDK и технологий.

6. Обеспечивает лицензионную чистоту.
7. Обеспечивает легитимность процесса разработки.

Комплекты средств проектирования (PDK) проверяют соответствие проекта требованиям производства и *целостность PDK* на протяжении всего процесса проектирования. Эти потребности сгруппированы по различным категориям, таким как Design Rule Checks (DRC), Layout Versus Schematic (LVS), Antenna, Electrical Rule Checking (ERC) и т.д...

Так как стоимость выпуска с использованием современных технологий очень высока, то к качеству PDK предъявляются особые требования, которые постоянно ужесточаются по мере уменьшения технологических норм. Постоянное сокращение цикла проектирования, влияет соответственно на сокращение времени, затрачиваемого на контроль качества PDK, а также усложняет процесс верификации.

Значимая часть верификации комплекта средств проектирования производится еще в процессе его разработки. Можно выделить три основных этапа:

1) Разработка командных файлов для проведения физической верификации с подготовкой квалификационных ячеек. Квалификационные ячейки — набор топологических тестовых структур зависящий от конструктивно технологических особенностей, иллюстрирующих правила проектирования для аттестации командных файлов физической верификации. Для каждого правила проектирования создается своя квалификационная ячейка.

2) Front-End разработка технологической библиотеки: SPICE-моделирование, back annotation, тестирование verilog представлений и тестирование влияния CDF параметров на расчет внутренних системных переменных «Operating Point», Instance parameter.

3) Back-End разработка технологической библиотеки: контроль генерации параметризованных ячеек (PCELL), генерация топологий приборов и их верификация в DRC и LVS, контроль работы скриптов автоматизации аналоговых элементов библиотеки.

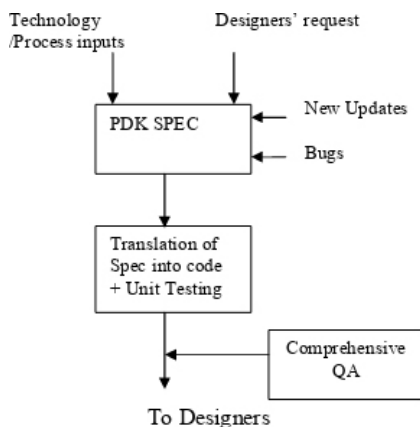


Рис. 1. Процесс разработки PDK

Заключение

Процесс проектирования ИС в решающей степени зависит от качества средств автоматизации электронного проектирования и лежащих в их основе библиотек. Ошибка на любом этапе процесса проектирования может распространиться дальше по маршруту проектирования, что приведет к необходимости повторения полного цикла работ по проектированию и изготовлению кристалла. Поэтому процесс контроля качества PDK является крайне важной задачей.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
3. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
4. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90–28 нм // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 619–622.

УДК 621.396.67

Построение системы управления лучом фазированной антенной решетки на основе ПЛИС

Русов Ю. С., к. т. н., Руссо Д. Р., Куренков П. П.

*МГТУ им. Н. Э. Баумана**105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*

Разработана схема построения системы управления лучом фазированной антенной решетки с ферритовыми фазовращателями. Система управления выполнена на базе ПЛИС и быстродействующих полупроводниковых ключей. Приведены основные параметры формируемых импульсов управления фазовращателями.

Ключевые слова: система управления лучом; фазированная антенная решетка; ПЛИС; формирователь импульсов.

Фазированные антенные решетки (ФАР) нашли широкое применение в различных радиотехнических системах. Например, ФАР используются в радиолокационных станциях зенитных ракетно-пушечных комплексов [1] и на беспилотных летательных аппаратах [2]. Для формирования необходимого фазового распределения в раскрыве ФАР применяется система управления лучом (СУЛ), которая формирует импульсы токов управления фазовращателями элементов ФАР.

Создание малогабаритных систем, способных быстро и точно управлять фазовым распределением электромагнитного поля в раскрыве ФАР, является актуальной задачей. Современные СУЛ ФАР должны обеспечивать поэлементное управление каждым фазовращателем антенной решетки и учитывать индивидуальные параметры каждого элемента ФАР. При разработке таких систем особое внимание уделяется их быстродействию. Например, для ФАР [1] время переключения элементов не превышает 100 мкс.

Для обеспечения необходимого быстродействия и возможности выполнять все необходимые функции СУЛ может быть реализована на основе ПЛИС [3]. Предложена схема построения быстродействующей СУЛ, управляющей ферритовыми фазовращателями ФАР с магнитной памятью посредством переменной длительности управляющих импульсов. СУЛ содержит также схемы контроля наличия обрывов или коротких замыканий в цепях управления фазовращателями. При создании СУЛ разработано программное обеспечение, позволяющее передавать в систему необходимые данные с использованием персонального компьютера.

Выполнение системы управления с применением ПЛИС позволило значительно снизить задержки, неизбежно возникающие при использовании логических схем, а также проводить процессы установки фазы и контроля токов нагрузок независимо друг от друга. В основе формирователя силовых импульсов лежат быстродействующие МОП-транзисторы со специализированными схемами драйверов затвора. Проведено исследование формируемых коммутационными устройствами силовых импульсов сброса и записи фазы фазовращателя и проведена оценка достижимых характеристик этих импульсов.

Создан канал управления восемью фазовращателями, включающий в себя непосредственно устройство управления, цепи сброса и записи фазы, а также систему контроля токов. Кроме того, разработано универсальное программное

обеспечение, которое может адаптироваться к различному числу фазовращателей в антенной системе, позволяя настраивать фазовые сдвиги для каждого из них. Это дает возможность применять табличный метод формирования фазовых распределений. Предусматривается модульное исполнение СУЛ, что дает возможность реализовывать технические решения для ФАР с различным количеством элементов.

Литература

1. Савенков Ю.А., Слугин В.Г., Шевцов О.Ю., Зубарев А.А., Крехтунов В.М., Ланцов А.А. Зенитная ракетно-пушечная боевая машина. Пат. 2584404 С1 Российская Федерация. Заяв. 17.02.2015. Опубл. 20.05.2016. Бюл. № 14.
2. Бушкин С.С., Головин С.А., Сорока Н.Н. Особенности разработки малогабаритных фазированных антенных решеток на ферритовых фазовращателях для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз — Антей», 2020. — № 1. — С. 19–25.
3. Русов Ю.С., Руссо Д.Р., Куренков П.П. Система управления лучом фазированной антенной решетки // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ (г. Воронеж, 18–20 апреля 2023 г.): в 5 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн “Созвездие”». — Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. — Т. 5. — С. 199–204.

УДК 621.315.592

Совместная диффузия фосфора и галлия в германии

Кобелева С. П., Юрчук С. Ю.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1**kob@misis.ru*

Рассмотрены особенности ко-диффузии фосфора и галлия в легированный галлием германий при создании элемента первого каскада многокаскадных СЭ. Коэффициенты диффузии рассчитаны из диффузионных профилей методом Заура—Фрейзе и координатно-зависимой диффузии. Полученные зависимости анализируются в рамках вакансионной модели диффузии.

Ключевые слова: германий; ко-диффузия фосфора и галлия; коэффициенты диффузии фосфора и галлия в германии; вакансионная модель диффузии.

Введение

Диффузия легирующих примесей является как одним из основных процессов создания пп приборов, так и процессом, который усложняет получение структур. В германии при концентрации легирующих примесей выше собственной концентрации электронов профиль растянут на больших концентрациях примеси. На основании этих данных был рассмотрен механизм диффузии фосфора в составе комплекса (V^mP) где m — зарядовое состояние вакансии германия, которая может быть однократно- или двукратно заряженным акцептором, на основании чего предложен механизм квадратичной диффузии, при которой коэффициент диффузии D зависел от n^2 , в последующем те же экспериментальные данные были обработаны в предположении о кубической зависимости D от n . Подробно литературные данные проанализированы в [1]. Авторы данного механизма диффузии не рассматривали случай диффузии фосфора при наличии избытка галлия, т.е. в материале p -типа. Такой случай был описан в [2, 3]. Поскольку диффузия фосфора осуществлялась из слоя $\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}$, у границы раздела в германии формировался p -слой и первоначально диффузия фосфора проходила в материале p -типа. В работе рассчитаны диффузионные профили галлия и германия для различных вариантов зависимости коэффициента диффузии фосфора от концентрации электронов.

Диффузионные профили при совместной диффузии фосфора и галлия в сильно легированный галлием германий

Моделирование процесса одновременной диффузии фосфора и галлия в германии проводили с помощью численного решения уравнения диффузии для каждого компонента.

Решение уравнения диффузии проводили методом конечных разностей с помощью метода прогонки.

Коэффициент диффузии галлия был оценен по измеренным методом ВИМС профилям в приближении постоянного коэффициента диффузии [3]. Использовали несколько зависимостей коэффициентов диффузии от n . Концентрацию электронов и дырок рассчитывали по уравнению электронейтральности, считая, что фосфор и галлий полностью ионизированы, остальными заряженными дефектами



пренебрегали. Подробности решения уравнения электронейтральности в вырожденном материале рассмотрены в [3].

При использовании квадратичного коэффициента диффузии профиль распределения фосфора значительно отличается от экспериментального. Определяется это тем, что при высокой концентрации Ga в приповерхностной области концентрация электронов мала и соответственно диффузионный профиль располагается вблизи поверхности.

Удовлетворительное совпадение с экспериментальными наблюдается при использовании значений $D(n)$, рассчитанных методом координатно-зависимой диффузии [3].

Поскольку концентрации примесей велики (выше 10^{18} см^{-3}), мало вероятно, что концентрация вакансий германия в этих областях будет такой же, т. е. диффузия в составе комплекса вакансия-примесь вряд ли реализуется. Однако общая тенденция повышения $D(P)$ с ростом n указывает на влияние отрицательно заряженных вакансий на процесс диффузии.

Заключение

Коэффициенты диффузии как фосфора, так и галлия, в значительной степени зависят от концентрации электронов, однако в сильно легированных материалах, когда концентрация примесей на границе раздела InGaP/Ge порядка 10^{20} см^{-3} , мало вероятно, что концентрация вакансий будет достаточна для образования комплексов (P^+V^-) . Возможные механизмы диффузии обсуждаются.

Литература

1. Kobleva S. P., Anfimov I., Yurchuk S. Phosphorus and Gallium Diffusion in Ge Sublayer of In_{0.01}Ga_{0.99}As/In_{0.56}Ga_{0.44}P/Ge Heterostructures. In Advanced Material and Device Applications with Germanium, chapter 3. — “IntechOpen” — 2018. — DOI: 10.5772/intechopen.78347ю
2. Кобелева С. П., Анфимов И. М., С.Ю., Выговская Е. А., Жалнин Б. В. Влияние гетероструктуры In_{0,56}Ga_{0,44}P/Ge на диффузию фосфора в германии при формировании многокаскадного солнечного элемента // Письма в журнал технической физики, 2012. — № 24. — С. 33–38.
3. Кобелева С. П., Анфимов И. М., Турутин А. В., Юрчук С. Ю., Фомин В. М. Анализ диффузионных профилей фосфора в легированном галлием германии методом координатно-зависимой диффузии // Известия вузов, МЭТ-2018. — Т. 21. — С. 122–128.

УДК 533.924

Технологии создания тренчевых интегральных конденсаторов с высокой емкостью

Мяконьких А. В.

Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
miakonkikh@ftian.ru

В докладе проведен обзор современных подходов к формированию интегральных тренчевых конденсаторов высокой емкости на основе диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью. Для этих материалов известны и разработаны технологии атомно-слоевого осаждения, позволяющие применять их в изготовлении тренчевых конденсаторов. Кроме того, в работе рассмотрен перспективный циклический процесс глубокого травления кремния, основанный на пассивации кремния за счет плазменного окисления или нитридации, обладающий рядом преимуществ по сравнению с известными как циклическими, так и непрерывными процессами.

Ключевые слова: интегральные конденсаторы; тренчевые конденсаторы; глубокое травление кремния; атомно-слоевое осаждение.

Введение

Применение атомно-слоевого осаждения в технологии создания конденсаторов высокой емкости открывает возможности формирования тренчевых конденсаторов — конформное осаждение диэлектрических и металлических слоев в тренчи высокого аспектного отношения позволяет существенно экономить площадь на чипе. Для повышения плотности удельной емкости топология тренчей может быть выполнена в виде параллельных канавок, колодцев, стобиков или иметь сложную геометрию.

Технологические подходы для формирования тренчевых конденсаторов

Диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью ZrO_2 и HfO_2 широко изучались в качестве материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости для замены классических изоляторов SiO_2 и $SiON$ из-за их относительно высокого значения диэлектрической проницаемости (>20), широкой запрещенной зоны 5,5–6,0 эВ и хорошо зарекомендовавших себя и исследованных процессов атомно-слоевого осаждения. Хотя ZrO_2 и HfO_2 имеют много общих свойств, ZrO_2 предпочтительнее для применений в конденсаторах DRAM, поскольку он позволяет получить кристаллическую структуру с более высоким значением диэлектрической проницаемости, в тетрагональной или кубической фазе, образующимися при осаждении без последующего отжига.

Другой альтернативой для применения в качестве диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в конденсаторах являются перовскиты, например, получаемые методами атомно-слоевого осаждения титанаты бария и стронция (BTO и STO). Известны стратегии процесса ALD, разработанные и оптимизированные для достижения желаемого состава и фазы, одновременно обеспечивая высокие диэлектрические постоянные и низкие токи утечки. Кроме того, применяются термический отжиг, плазменная обработка и формирование затравочных



слоев и специализированных прекурсоров для улучшения свойств ВТО и СТО с помощью различных механизмов.

Основной трудностью при анизотропном травлении кремния во фторсодержащей плазме является спонтанное травление боковых стенок за счет реакции с активными радикалами фтора. Один из подходов к решению этой проблемы — проведение травления при пониженных температурах в плазме смеси газов SF_6 и O_2 , при которых образующиеся в результате травления продукты вида $Si_xF_yO_z$ пассивируют боковые стенки микроструктуры и исключают латеральное травление [1]. Наклон боковой стенки получаемой микроструктуры определяется соотношением компонент плазмообразующего газа. В работе исследовано криотравление отверстий и тренчей в кремнии с аспектным отношением до 20. Шероховатость боковых стенок исследовалась при помощи сканирующего электронного микроскопа и атомно-силового микроскопа. Представлены результаты моделирования профиля травления методом Монте-Карло, объясняющие наблюдающиеся особенности криопротекса [2].

Другой известной технологией глубокого анизотропного травления Si является процесс, состоящий из последовательных чередующихся стадий травления и пассивации стенок. Известный Bosch-процесс основан на использовании в качестве пассиванта — слоя полимера, осаждаемого из полимеробразующей плазмы (C_4F_8 , CHF_3 и т.п.). Общей проблемой подобных процессов является сложность полного удаления образовавшегося при травлении полимера, как последующими плазменными, так и жидкостными методами.

В настоящей работе обсуждается также и альтернативный процесс [3], в котором в качестве пассиванта используется слой оксида кремния SiO_x , получающийся при окислении поверхности кремния в плазме кислорода, стадия травления проводится затем в плазме SF_6 . Естественный недостаток такого процесса — плохая стойкость маски из фоторезиста может быть устранен в процессе глубокого травления кремния, в котором вместо окисления применяется нитридизация поверхности кремния в плазме азота [4].

Заключение

В докладе проведен обзор современных подходов к формированию интегральных конденсаторов высокой емкости на основе диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью. Для этих материалов известны и разработаны технологии атомно-слоевого осаждения, позволяющие применять их в изготовлении тренчевых конденсаторов. Кроме того, в работе рассмотрен перспективный циклический процесс глубокого травления кремния, обладающий рядом преимуществ по сравнению с известными как циклическими так и непрерывными процессами, основанный на пассивации кремния за счет плазменного окисления или нитридизации.

Литература

1. Мьяконьких А. В., Руденко К. В., Куваев К. Ю., Лукичев В. Ф., Гушин О. П., Мишин Н. Г., Юнкин В. А., Снегирёв А. А. Процессы криогенно травления кремния для формирования структур нанoeлектроники, микромеханики и преломляющий рентгеновской оптики. В книге: Международный форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов, 2019. — С. 200–203.

2. Руденко М. К., Мяконьких А. В., Лукичев В. Ф. Математическое моделирование аспектной зависимости глубокого криогенного травления кремния для различных вариантов топологии маски // Нано- и микросистемная техника, 2023. — Т. 25. — № 1. — С. 3–9.
3. Аверкин С. Н., Антипов А. П., Лукичев В. Ф., Мяконьких А. В., Руденко К. В., Рылов А. А., Семин Ю. Ф. Способ анизотропного плазменного травления кремниевых микроструктур в циклическом двухшаговом процессе окисление-травление. Патент на изобретение RU 2691758 С1, 18.06.2019. Заявка № 2018130004 от 17.08.2018.
4. Аверкин С. Н., Кузьменко В. О., Лукичев В. Ф., Мяконьких А. В., Руденко К. В., Семин Ю. Ф. Способ анизотропного плазменного травления кремниевых микроструктур в циклическом процессе нитридизация-травление. Патент на изобретение 2796239 С1, 18.05.2023. Заявка № 2022129841 от 17.11.2022.



УДК 62-416

Синтез методом CVD и исследование монокристаллов алмаза для микроэлектроники

Балинов Д. А.¹, Кан В. Е.^{1,2}, Кириченко А. Н.³, Родионов Н. Б.³

¹ ООО «ФРЕЗАРТ СВД»

117587, г. Москва, ул. Днепропетровская, 2, оф. 514

d.balinov@frezart.ru

² ОНЦ СО РАН

644024, г. Омск, просп. Карла Маркса, 15

³ Частное учреждение «ИТЭР-Центр»

123060, г. Москва, ул. Расплетина, 11, корп. 2

В работе представлены результаты исследований режимов синтеза монокристаллов алмаза методом CVD, направленных на получение материала, пригодного для производства микроэлектроники.

Ключевые слова: монокристаллический алмаз; синтез; микроэлектроника; газофазный синтез; кристаллы электронного качества.

Развитие электронной техники приводит к росту требований к используемой в ней ЭКБ. К настоящему времени ведутся интенсивные исследования по разработке технологии изготовления ЭКБ на основе новых полупроводниковых материалов. Синтетический алмаз является одним из наиболее перспективных материалов, обладающих такими свойствами, как радиационная стойкость, большая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность носителей заряда, термическая стойкость, рекордный коэффициент теплопроводности. Отработанная технология на основе метода химического осаждения из газовой фазы (CVD) позволяет получать монокристаллические кристаллы алмаза с низкой концентрацией примесей и дефектов, пригодные для применения в микроэлектронике.

Исследованы материалы, выращенные на установке CVD-синтеза (Alkion, Индия, частота 2,45 ГГц, мощность до 6 кВт, рис. 1, слева). Варьируемыми параметрами при исследовании были рабочее давление в камере синтеза, температура подложки, мощность излучения, а также состав и пропорция газов в рабочей смеси. Синтезированные монокристаллические слитки (рис. 1, справа) были очищены от внешних поликристаллических наростов, разрезаны на заготовки пластин и отполированы с двух сторон. В результате были получены монокристаллические пластины размером до 8×8×0,5 мм. Достигнута шероховатость поверхности — до $rmz = 0,2$ нм [1]. Достигнутая скорость роста — до 15 мкм в час.

Полученные монокристаллические пластины были исследованы методами спектроскопии КРС, ИК-спектроскопии, фотолюминесценции, полярископии, АСМ. Установлено, что пластины относятся к группе алмаза ПА (с низким содержанием азота), моносекторальность — более 75%. Полученные результаты являются заделом для разработки промышленной технологии изготовления пластин из монокристаллического алмаза для микроэлектронной промышленности.

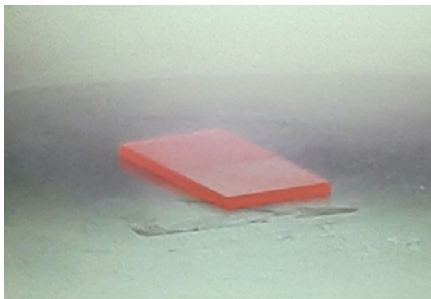


Рис. 1. Установка CVD-синтеза Alkion (слева),
рост монокристаллических алмазных слитков (справа)

Литература

1. Кан В. Е., Колесанов А. Ф. Синтез и обработка монокристаллического алмаза для изделий микроэлектроники // Тезисы докладов научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули». Российский форум «Микроэлектроника-2022». — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. — С. 606–607.

УДК 547.279.2

Эффект заместителей катиона трифенилсульфониевых солей на их физико-химические свойства в составе композиции фоторезиста

Сидельцев М. Е.¹, Кузнецова Н. А.², Малимоненко Н. В.², Кузнецов И. Е.¹,
Малков Г. В.¹, Бадамшина Э. Р.¹, Аккуратов А. В.¹

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН

142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 1
Sideltsev.max@yandex.ru

² АО «Научно-исследовательский институт
органических полупродуктов и красителей»
123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, 1, корп. 4

В матрице пленкообразующего полимера исследованы спектральные характеристики трех фотогенераторов кислоты на основе трифенилсульфония и его производных. Оценены квантовые выходы и литографические показатели в составе фоторезистов.

Ключевые слова: фотогенератор кислоты; квантовый выход; коэффициент молярной экстинкции; фоторезист.

Введение

Одним из ключевых факторов развития микроэлектронной промышленности на протяжении последних нескольких десятилетий было усовершенствование технологии литографического процесса с использованием фоторезистов [1]. Одним из ключевых компонентов фоторезиста, определяющим эффективность процесса литографии, является фотогенератор кислоты (ФГК), который под действием света разрушается с образованием кислоты, что в последствие приводит к возможности растворения фоторезиста в щелочном проявителе.

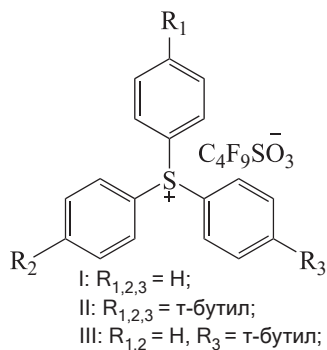


Рис. 1. Химическая структура ФГК (I)–(III)

Наиболее эффективными ФГК считаются трифенилсульфониевые соли сильных кислот, таких, как трифторметан- и перфторбутансульфонокислота [2]. Однако данных об эффективности генерации кислоты этими соединениями недостаточно. В литературе отсутствуют систематические исследования влияния структурных факторов на спектральную чувствительность к актиничному излучению и квантовые выходы генерации кислоты, важные для практического использования. В данной работе были исследованы соли трифенилсульфония и его трет-бутил-замещенных производных (I)–(III) (рис. 1).

Исследование физико-химических свойств ФГК в составе фоторезиста

Важной спектральной характеристикой ФГК является коэффициент молярной экстинкции, который был оценен с помощью электронной спектроскопии поглощения для каждого соединения (табл. 1).

В матрице пленкообразующего полимера фотогенераторы кислоты на основе солей трифенилсульфония и его трет-бутил-замещенных производных находятся в мономерном состоянии и имеют близкие коэффициенты молярной экстинкции на длине волны излучения эксимерного лазера на ArF (193 нм). При переходе к длине волны 248 нм (лазер на эксимерах KrF) спектральная чувствительность фотогенератора снижается в 3–5 раз.

Таблица 1. Спектральные характеристики ФГК в матрице полимера

Соединение	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	λ , нм		
		193	248	максимум
		ϵ , $\text{см}^{-1} \text{M}^{-1}$		
I	235	64000	14000	19700
II	238	64000	17000	21000
III	242	65000	25000	27000

Квантовые выходы Φ_{H^+} определены при облучении светодиодным источником излучения с длиной волны 257 нм, моделирующим условия эксимерного лазера на KrF (248 нм), и приведены в табл. 2. Введение трет-бутильных заместителей в катион трифенилсульфония приводит к разнонаправленным изменениям показателя поглощения на длине волны 248 нм и Φ_{H^+} . Так, поглощение при замещении увеличивается, Φ_{H^+} — снижается ($\Phi_{\text{H}^+} = 0,59, 0,46$ и $0,30$ для солей трифенилсульфония, его моно- и три-замещенного производного, соответственно). При этом светочувствительность фоторезиста с ФГК этого ряда и константа скорости фотогенерации кислоты в пленке фоторезиста (параметр Дилла C) увеличиваются, поскольку снижение Φ_{H^+} компенсируется увеличением поглощения фотогенератором актиничного излучения ($I - T$).

Таблица 2. Квантовые выходы фотогенерации кислоты для соединений (I)–(III) и литографические показатели фоторезистов

Соединение	E_0 , мДж/см ² (для 0% основания)	Параметр Дилла С, см ² /мДж	Φ_{H^+}	(1 – T)
I	5,5	0,022	$0,59 \pm 0,03$	0,027
II	4,0	0,027	$0,46 \pm 0,02$	0,043
III	3,5	0,031	$0,30 \pm 0,01$	0,075

Заключение

Наиболее чувствительный к свету с $\lambda_n = 248$ нм фоторезист получен с нонафлатом трис-(*n*-трет-бутилфенил)сульфония. Поскольку на длине волны 193 нм все исследованные ФГК имеют практически одинаковое поглощение, то светочувствительность фоторезиста к излучению лазера на эксимерах ArF уже определяет величина Φ_{H^+} фотогенератора. В этом случае в композиции фоторезиста следует использовать соль незамещенного трифенилсульфония.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (122111700041-8)

Литература

1. Okoroanyanwu U. Chemistry and lithography // SPIE, 2010.
2. Кузнецова Н. А., Малков Г. В., Грибов Б. Г. Фотохимические генераторы кислоты. Применение и современное состояние разработок // Успехи химии, 2020. — Т. 89. — № 2. — С. 173–190.

УДК 621.382

Расчетно-экспериментальный метод учета влияния формы импульса при испытаниях изделий ЭКБ

Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Земцов А. Э.

АО «Научно-исследовательский институт приборов»

140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8

DMArzamasceva@niipribor.ru

В рамках совершенствования метода учета влияния формы импульса для установок, обладающих различной эффективной длительностью импульса, были рассчитаны значения коэффициентов относительной эффективности в зависимости от параметра инерционности изделий τ^* . Предложен оптимальный алгоритм определения τ^* .

Ключевые слова: параметр инерционности; радиационная переходная характеристика

Введение

Учет формы и длительности импульса при испытаниях изделий ЭКБ проводится расчетно-экспериментальным методом, основанным на теории линейных систем [1–2]. При расчете норм испытаний ЭКБ вводится поправочный коэффициент, который учитывает различия в форме и длительности импульсов типовых (реальных) условий применения ЭКБ и моделирующей установки (МУ).

Длительное время этот учет проводился в соответствии с [3], однако, данная методика имеет ряд недостатков (не применима к изделиям со значением параметра инерционности τ^* более 1,5 мкс и т. д.), в связи с чем требуется ее доработка.

Расчетный метод определения значений параметров инерционности заключается в получении ионизационной реакции изделия на воздействие, которая может быть получена с помощью интеграла Дюамеля:

$$R(t) = k \int_0^t P_{\gamma}(y) \cdot h(t-y) dy, \quad (1)$$

где $h(t-y)$ — радиационная переходная характеристика (РПХ), которая может иметь следующие формы (табл. 1):

Таблица 1. Различные формы РПХ

Экспоненциальная	Гиперболическая	Степенная	Гарантирующая
$\frac{1}{\tau^*} \cdot e^{-\frac{t}{\tau^*}}$	$\frac{1}{\tau^*} \cdot \frac{1}{1 + t/\tau^*}$	$\left[1 + \left(\frac{\tau^*}{t} \right)^{1/\nu} \right]^{-\nu-1} \cdot \left(\frac{\tau^*}{t} \right)^{1/\nu} \cdot \frac{1}{t}, \nu = 3/2$	$\begin{cases} 1/\tau^*, & t < \tau^* \\ 0, & t > \tau^* \end{cases}$

Из рис. 1 видно, что наиболее консервативную оценку дает «гарантирующая» и гиперболическая РПХ.

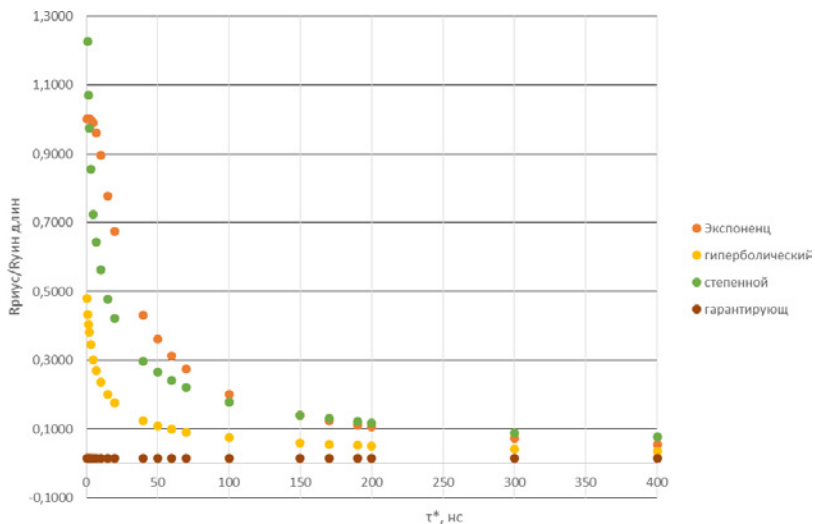


Рис. 1. Соотношение уровней бессбойной работы (УБР) на установках РИУС и УИН длин от параметра инерционности

Параметр α определяется как отношение значений УБР при воздействии двух импульсов ИИ с различной формой и длительностью (микросекундного и наносекундного):

$$\alpha = \frac{\mathcal{E}_\gamma^{\text{МУ1}} \cdot R_{\text{макр}}^{\text{МУ1}}}{\mathcal{E}_\gamma^{\text{МУ2}} \cdot R_{\text{макр}}^{\text{МУ2}}}, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_γ — эффективность воздействия в чувствительных областях изделия.

В настоящей работе коэффициент α рассчитывался для шести пар установок. Максимальное значение интеграла (1) $R_{\text{макр}}^{\text{МУ}}$, а затем и α рассчитывались для набора τ^* от 1 до 10000 нс и экспоненциальной формы РПХ, что позволяет применять данную методику как для изделий с большим значением τ^* , так и с малым (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость значения α от параметра τ^*

РИУС-5/ УИН-10М (к)	Значение α					τ^* , нс
	РИУС-5/ УИН-10М (длин)	ЛИУ-10/ УИН-10М (к)	ЛИУ-10/ УИН-10М (длин)	РИУС-5/ БАРС	ЛИУ-10/ БАРС	
1,03	1,06	0,99	0,89	0,98	0,94	1
0,74	0,67	0,44	0,37	0,65	0,39	10
0,38	0,18	0,14	0,058	0,16	0,059	100
0,33	0,044	0,097	0,010	0,022	0,006	1000
0,32	0,022	0,091	0,0051	0,0023	0,0007	10000

Заключение

Оптимальный алгоритм определения значений параметров инерционности с учетом возможностей представленного парка установок заключается в проведении последовательных экспериментов на установках, начиная с установок с короткой длительностью импульса. В зависимости от значения параметра инерционности изделия, величина которого оценивается в ходе проведения экспериментов для каждой пары установок, эксперименты на установках с большой длительностью могут не проводиться, если в ходе экспериментов была достигнута достоверная оценка значения параметра инерционности.

Литература

1. Согоян А. В. Гарантирующее оценивание радиационной переходной характеристики изделий ЭКБ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2021. — Вып. 2. — С. 5–15.
2. Чумаков А. И., Гонтарь В. В. Прогнозирование уровней отказов и сбоях ИС при воздействии ионизирующего излучения с произвольной формой импульса // Микроэлектроника, 2004. — Т. 33. — № 2. — С. 134–141.
3. Романенко А. А., Зинченко В. Ф., Шиян В. Д. Расчетно-экспериментальный метод учета и оценки влияния формы импульсного гамма-излучения на отклик изделий электронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2009. — Вып. 4. — С. 43–48.



УДК 621.3.049.77

Особенности формирования несплавных омических контактов для GaN МИС СВЧ

Рогачёв И. А.,¹ Добров А. В.,¹ Красник В. А.,¹ Дудинов К. В.,¹
Цацульников А. Ф.,² Егоркин В. И.³

¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru

² НТЦ микроэлектроники РАН

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
info@ntcm-ras.ru

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
netadm@miee.ru

Рассмотрены возможность и особенности формирования несплавных омических контактов для нитридгаллиевых МИС СВЧ посредством селективного эпитаксиального роста сильнолегированных кремнием полупроводниковых структур GaN, выращенных методами МВЕ и МOCVD.

Ключевые слова: GaN МИС СВЧ; несплавные омические контакты; МВЕ; МOCVD; селективный рост эпитаксиальных структур.

Введение

Гетероструктуры GaN и его твердых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают электронным приборам, выполненным на их основе, высокие оптические, мощностные и частотные характеристики, что позволяет применять их в разных областях полупроводниковой электроники [1].

Основное преимущество нитрида галлия перед остальными распространенными материалами электроники — широкая запрещенная зона — 3,5 эВ, что позволяет GaN-транзисторам работать при более высоких температурах и менее чувствительны к ионизирующему излучению (в теории рабочая температура GaN-приборов достигает 500 °С, на практике же она пока что равна 150–200 °С [2]).

Несмотря на достоинства этого материала, у него есть и недостатки, которые связаны в основном с технологией изготовления приборов на его основе. Одна из таких проблем — создание качественного омического контакта. Традиционно, омических контакт получают путем быстрого термического отжига стандартной для GaN металлизации — Ti/Al/Ni/Au. Отжиг проводят при высоких температурах 800–900 °С, что приводит к ухудшению морфологии и геометрии омического контакта и дальнейшим технологическим трудностям. Применение технологии селективного роста сильно легированных эпитаксиальных структур позволяет избежать этих проблем, так как в этом случае нет необходимости в высокотемпературном отжиге.

Экспериментальная часть

В качестве исходного материала использовались гетероэпитаксиальные структуры нитрида галлия с тонким слоем AlN на кремниевой подложке, структуры были выращены на предприятии «НТЦ-Микроэлектроники РАН». Далее была

сформирована топология для роста селективного роста сильнолегированных кремнием слоев нитрида галлия. Формирование сильнолегированного полупроводникового слоя проводили методами MOCVD (рис. 1) и MBE (рис. 1).

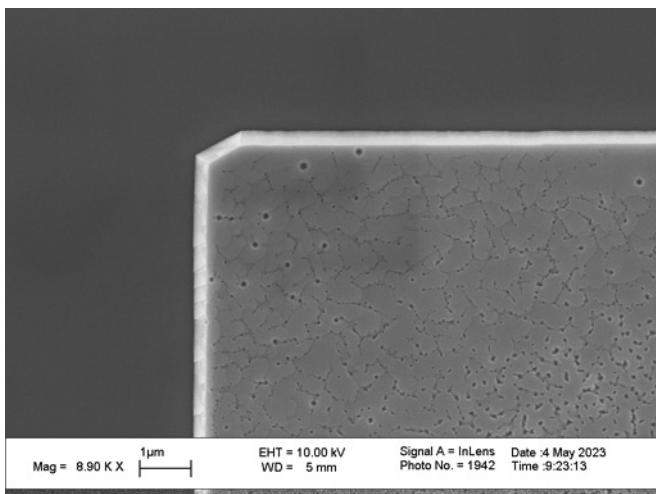


Рис. 1. Снимок селективно выращенного сильнолегированного кремнием слоя нитрида галлия методом MOCVD

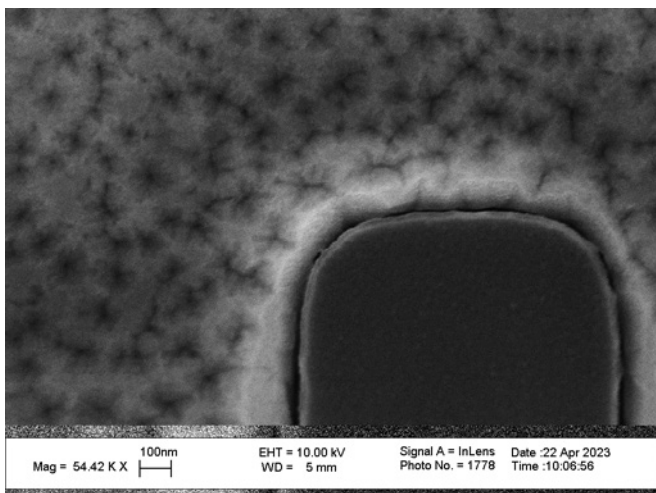


Рис. 2. Снимок селективно выращенного сильнолегированного кремнием слоя нитрида галлия методом MOCVD



Далее были сформированы металлизация омических контактов Ti/Pt/Au и мезаизоляция методом реактивного ионного травления в плазме BCl_3/Cl_2 . После этого было измерено их удельное сопротивление методом длинных линий. В результате были получены значения 0,1 Ом·мм для метода MOCVD и 0,03 Ом·мм для метода MBE.

Заключение

В результате проделанной работы были изготовлены несплавные омические контакты для нитридгаллиевых МИС СВЧ путем селективного роста сильнолегированных кремнием полупроводниковых слоев нитрида галлия методами MOCVD и MBE. Удельное сопротивление омических контактов, изготовленных с применением селективно ого эпитаксиального роста методом MBE оказалось более чем в три раза ниже по сравнению с сопротивлением омических контактов, изготовленных с применением метода MOCVD.

Литература

1. Балакирев А., Туркин А. Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике // Электроника, 2015. — № 4 (144). — С. 64–69.
2. Громов Д. В., Краснюк А. А. Материаловедение для микро- и нанoeлектроники. — М.: МИФИ, 2008. — 156 с.

УДК 53.043, 53.09

Исследование факторов возникновения неровности наноструктур и ее влияния на характеристики приборов

Шарапов А. А.^{1,2}, Горнев Е. С.¹¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
asharapov@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложена систематизация факторов, приводящих к возникновению и модификации неровности боковых поверхностей наноразмерных структур. Рассмотрено влияние данного вида геометрических отклонений на характеристики приборов микроэлектроники и фотоники.

Ключевые слова: неровность края; шероховатость; наноразмерные структуры.

Введение

Масштабирование технологий создания КМОП микросхем отражается в уменьшении критических размеров транзисторов [1]. Однако обнаружено, что статистический разброс этих критических размеров практически не сокращается [2]. Эта ситуация ведет к тому, что на малых проектных нормах наблюдаются неуправляемые изменения действительных критических размеров структур, что в свою очередь провоцирует ухудшение электрофизических характеристик приборов и снижает повторяемость их характеристик на уровне кристалла [3].

Анализ факторов возникновения неровности наноструктур

На сегодняшний день в изучении геометрических свойств топографии поверхностей наноструктур широко используются такие методы измерения, как сканирующая зондовая микроскопия, интерферометрия высокого разрешения и фазовая микроскопия [4–5]. Говоря в общем, шероховатость определяется как свойство поверхности. Однако в микроэлектронике наиболее важно качество боковой поверхности топологических элементов, которая обладает свойством топографической симметрии по вертикали [6]. Таким образом, представляется возможным анализировать не всю боковую поверхность, а только геометрию ее края в любом трансверсальном сечении. Это существенно расширяет применение растровой электронной микроскопии в качестве метрологического средства в области микроэлектронного производства. Вместе с этим совершенствуются и методы статистического анализа полученных данных измерений. В работе [7] представлен сравнительный анализ наиболее часто используемых методик в практическом применении.

В данной работе рассмотрено несколько механизмов появления и модификации шероховатости структур микро- и нанoeлектроники, вызванные как физико-химическими свойствами веществ, участвующих в процессе формирования топологического рисунка в материале, так и оптической части механизма переноса топологии с фотошаблона на поверхность резиста.

Отдельное рассмотрение заслуживают эффекты, вносимые искажениями от различных средств измерения шероховатости. При этом сами неровности,

отображающиеся в результатах измерений и анализа, могут отсутствовать на изначальных образцах исследуемых наноструктур.

Заключение

Авторы считают, что в данной работе новым является комплексный анализ основных физических эффектов, влияющих на неровность поверхностей наноразмерных топологических структур микроэлектроники, а также предложения о методах управления шероховатостью в микро- и нанoeлектронике.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: Техносфера, 2011.
2. Allan A., Edenfeld D., Joyner W., Kahng A., Rodgers M. and Zorian Y. International Technology Roadmap for Semiconductors // IEEE Comput., Jan. 2002
3. Bilski B., Frenner K. and Osten W. About the influence of Line Edge Roughness on measured effective CD // Optics Express, 2011. Vol. 19. № 021. P. 19967–19972.
4. Горнев Е. С., Календин В. В., Новиков Ю. А., Раков А. В., Тодуа П. А. Метрологическое обеспечение линейных измерений в нанотехнологии // Материалы электронной техники. Известия вузов, 2004. — № 2. — С. 55–59.
5. Золотаревский С. Ю. Обеспечение единства измерений геометрических параметров шероховатости поверхностей в нанометровом диапазоне методами интерферометрии высокого разрешения: дисс. ... д-ра техн. наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2015.
6. Баранов Г. В., Миленин А. П., Бакланов М. Р. Изучение влияния шага плазменного травления на шероховатость стенок канала FinFET в схеме гетероинтеграции. // Микроэлектроника, 2016. — Т. 45. — Вып. 3. — С. 197–202.
7. Шаратов А. А., Баранов Г. В. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур // Труды МФТИ, 2018. — Т. 10. — № 2 (38). — С. 72–79.

УДК 621.315.592.4

Низкотемпературное радикальное ISSG окисление кремнияГорохов С. А.^{1,2}, Черняев М. В.¹, Патюков С. И.¹, Резванов А. А.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, б, стр. 1

sgorohov@niime.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследована кинетика радикального окисления кремниевой пластины в системе индивидуальной обработки при проведении процесса низкотемпературного окисления (500–800 °С) с генерацией пара у поверхности пластины (in situ steam-generation — ISSG).

Ключевые слова: радикальное окисление; кинетика роста оксида кремния; экспоненциальный закон роста; самоограничение толщины оксида.

Введение

Благодаря уникальным свойствам границы раздела Si–SiO₂, в течении более 30 лет оксид кремния, сформированный при высокой температуре в сухой или влажной атмосфере, был основным материалом при формировании подзатворного диэлектрика в металл-оксид-полупроводниковых (МОП) транзисторах [1]. Ответом на новые технологические требования стало создание процесса ISSG окисления при пониженном давлении. Кинетика ISSG окисления в высокотемпературном диапазоне (850–1050 °С) подробно изучена в нашей работе [2], где показано, что скорость окисления изменяется в соответствии с экспоненциальным законом. В настоящее время отсутствуют опубликованные работы, исследующие кинетику ISSG окисления в низкотемпературном диапазоне (ниже 700 °С), что и является целью данной работы.

Результаты и обсуждение

Радикальное окисление проводили в температурном диапазоне 500–800 °С при давлении в камере 5 торр. Выбор технологических параметров процесса для достижения максимального количества радикалов кислорода определялся по результату предварительного моделирования состава газовой среды в реакторе пониженного давления, которое детально описано в нашей работе [3].

В экспоненциальной модели роста оксида скорость окисления выражается двумя слагаемыми: постоянным — R_{Lp} , описывающим линейно параболический рост, и экспоненциально затухающим с увеличением толщины оксида — R_R , описывающим радикальное окисление:

$$R(L) = \Delta L / \Delta t = R_{Lp} + R_R \cdot e^{-L/L_c}, \quad (1)$$

$$L(t_0 + \Delta t) = L(t_0) + R(L) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где R_{Lp} , R_R , $L_c = f(T, p, C)$, R — скорость окисления, L — толщина оксида, L_c — критическая толщина, t — время, T — температура процесса, p — давление, C — концентрация окислителя.

Используя данные временных рядов толщины оксида, представленные на рис. 1а, определили зависимости скорости ISSG окисления от толщины оксида для разной температуры процесса (рис. 1б). Полученные данные скоростей аппроксимировали экспоненциальной зависимостью (1), определив таким образом значения констант R_{LP} , R_R и L_C для каждой температуры (табл. 1).

Анализируя представленные на рис. 4 и 5 данные следует отметить следующее:

- высокое соответствие экспериментальным данным экспоненциальной модели скорости радикального окисления в исследуемом температурном диапазоне;
- низкое значение разброса толщины по пластине; на всех исследуемых пластинах абсолютная величина разброса не превышала $1,4 \text{ \AA}$, а для образцов, окисленных при 500°C — $0,6 \text{ \AA}$;
- самоограничение толщины оксида при температуре ниже 700°C . Так при температуре окисления 600°C толщина ограничена значением $7,6 \text{ \AA}$, при 500°C — $6,3 \text{ \AA}$, — при данных толщинах скорость окисления приближается к нулю.

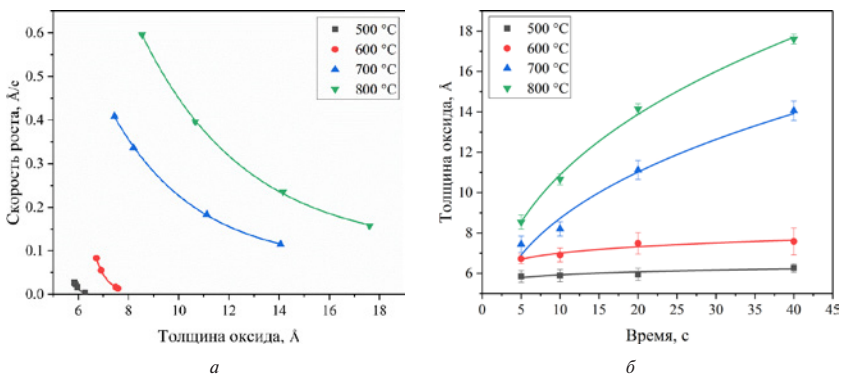


Рис. 1. Зависимость толщины от времени окисления для различной температуры (а); Зависимость скорости окисления от толщины для различной температуры (б)

Таблица 1. Параметры аппроксимации экспериментальных данных уравнением экспоненциальной модели (1)

Уравнение	$y = R_{LP} + R_R \cdot \exp(-L/L_C)$			
Температура, °C	500	600	700	800
R_{LP} , А/с	$(3,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	$(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(6,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-1}$
R_R , А/с	$(4,3 \pm 0,3) \cdot 10^{11}$	$(2,9 \pm 0,2) \cdot 10^5$	$3,1 \pm 0,4$	$3,8 \pm 0,4$
L_C , А	$0,1924 \pm 0,0004$	$0,445 \pm 0,003$	$3,4 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,3$
R-Square (COD)	1	1	0,99983	0,99976

Заключение

Показано, что скорость низкотемпературного радикального ISSG окисления характеризуется экспоненциальным законом роста, что позволяет сделать вывод о едином механизме ISSG радикального окисления в диапазоне температуры 500–1050 °С. Самоограничение толщины оксида при температуре ниже 700 °С имеет большое практическое значение, так как позволяет управлять процессом формирования тонкого диэлектрика температурой, а не временем процесса, что используется для создания прецизионного диэлектрика толщиной менее 1 нм или приграничного слоя более толстых диэлектриков в двух стадийном процессе окисления.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 177.
2. Черняев М. В., Горохов С. А., Патюков С. И., Резванов А. А. Кинетика радикального окисления кремния // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 31–44.
3. Черняев М. В., Горохов С. А., Патюков С. И., Ганыкина Е. А., Резванов А. А., Заев И. А., Хорьков В. А. Моделирование процесса ISSG окисления с применением модели реактора идеального смешения // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2022. — № 1 (185). — С. 87–93.



УДК 620.3

Сухая аэрозольная печать для изготовления плазмонных наноструктур

Каменева Е. И., Лизунова А. А., Филалова Э. М., Мусаев А. Г.,
Корнюшин Д. В., Мало Д., Иванов В. В.

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

Работа посвящена созданию плазмонных наноструктур методом сухой аэрозольной печати. Описана технология синтеза наночастиц в газовом разряде с использованием различных металлов. Созданы нанобъекты, эффективные для усиления электромагнитного поля.

Ключевые слова: наночастицы; плазмонные наноструктуры; алюминий; золото; сухая аэрозольная печать.

В последнее время большой интерес представляет получение наночастиц из таких металлов как Au, Ag, Cu, Al, а также гибридных наноструктур с различной морфологией, которые впоследствии находят применение в наноэлектронике, нелинейной оптике и других областях [1] за счет своей способности усиливать сигналы SERS (поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии) и люминесценции [2].

Метод сухой аэрозольной печати [3], используемый для получения наночастиц и создания наноструктур, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами, такими как электронная литография, осаждение из газовой фазы [4], фотохимическое осаждение [5]. Наиболее ценным преимуществом является возможность контролировать процесс синтеза наночастиц в режиме реального времени благодаря широкому диапазону параметров газового разряда. Также для синтеза наночастиц в газовом разряде возможно использовать различные доступные металлы, их оксиды [6] и сплавы [7].

Целью работы является демонстрация применения метода сухой аэрозольной печати в создании нанобъектов из различных металлов, способных многократно усиливать электромагнитное поле.

В ходе работы данным методом были получены плазмонные наноструктуры из частиц золота в качестве подложек SERS, а также была отработана технология печати различных тонкопленочных алюминиевых наноструктур, пик инстинкции которых находится в диапазоне 200–300 нм.

По результатам исследований с помощью спектрометра комбинационного рассеяния света ThermoScientific DXR Raman Microscope (лазер с длиной волны 780 нм) на некоторых наноструктурах золота коэффициент усиления достигал $12,8 \cdot 10^3$.

Были созданы различные рисунки тонкопленочных алюминиевых наноструктур и подобраны оптимальные параметры печати для каждого типа. Также была исследована оптическая плотность каждой структуры с помощью спектрофотометра JASCO V-770 (Япония).

Технология сухой аэрозольной печати показала себя как перспективный метод для создания наноструктур, способных эффективно усиливать сигнал рамановского рассеяния и люминесценцию в ультрафиолетовом диапазоне. Меняя параметры

печати, мы имеем возможность получить нанообъекты с различной морфологией, толщиной, усиливающей способностью, а также с различным рисунком.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках исследования технологии изготовления плазмонных наноструктур методом аэрозольной сухой печати (проект №22-19-00311, <https://rscf.ru/project/22-19-00311>).

Литература

1. Vaughn D. D. and Schaak R. E. // Chem. Soc. Rev., 2013. 42 2861.
2. Shinki M., Shreya J., Subhendu S. Role of Au–Ag alloy plasmonic layer thickness over pyramidal silicon in controlling SERS activity // The European Physical Journal Special Topics, 2022. Vol. 231. P. 791–797.
3. Efimov A. A., Arsenov P. V., Borisov V. I., Buchnev A. I., Lizunova A. A., Kornyshev D. V., Tikhonov S. S., Musayev A. G., Urazov M. N., Shcherbakov M. I., Spirin D. V., Ivanov V. V. // Nanomaterials, 2021. 11 234.
4. Jarvis R. M. and Goodacre R. // Analytical Chemistry, 2004. 76 (1). 40–47.
5. Keating C. D., Kovalski K. K. and Natan M. J. // The Journal of Physical Chemistry B, 1998. 102, 9414.
6. Tabrizi N. S., Ullmann M., Vons V. A., Lafont U., Schmidt-Ott A. Generation of nanoparticles by spark discharge // J. Nanoparticle Res., 2009. 11, 315–332.
7. Tabrizi N. S., Xu Q., Van Der Pers N. M., Schmidt-Ott A. Generation of mixed metallic nanoparticles from immiscible metals by spark discharge // J. Nanopart. Res., 2010. 12, 247–259.

УДК 621.317

Измерительно-аналитический комплекс для комплексной диагностики полупроводниковых микро- и наноструктур

Трусов Е. П., Ермачихин А. В., Литвинов В. Г.

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
eprusov@yandex.ru*

В работе обсуждаются проблемы, связанные с комплексным исследованием и контролем физических процессов, связанных с наличием дефектов и электронных состояний в полупроводниковых микро- и квантово-размерных структурах с помощью измерительно-аналитического комплекса токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (ТРСГУ), методов вольт-амперных характеристик и спектроскопии адмиттанса.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс; релаксационная спектроскопия глубоких уровней; электронные состояния; обработка сигнала.

Введение

Для обеспечения контроля параметров и изучения физических процессов, связанных с перезарядкой электронных уровней, в полупроводниковых гетероструктурах используются электрические спектроскопические методы диагностики — разновидности релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) [1]. Во время перезарядки электронных уровней в активных областях полупроводниковой структуры происходят процессы релаксации электрической емкости, тока или заряда по экспоненциальному закону. При реализации исследований с использованием РСГУ производятся измерения температурной зависимости постоянной времени релаксации сигнала. В работе комплекса реализовано несколько методов обработки релаксационных сигналов.

Автоматизированный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней

В работе рассматриваются вопросы разработки измерительно-аналитического комплекса для анализа электронных состояний в полупроводниковых квантово-размерных структурах. Основным методом измерения аналитического комплекса является ТРСГУ. Комплекс позволяет проводить температурные исследования в диапазоне от 10 до 500 К [2].

Процесс релаксации заполнения состояний дефектов в исследуемой полупроводниковой структуре интерпретируется суммой частных релаксационных процессов, связанных отдельно с каждым из дефектов. При представлении элементарного релаксационного процесса экспоненциальной функцией, суммарный сигнал релаксации выражается как:

$$f(t) = \int_0^{+\infty} F(s)e^{-st} ds,$$

где s скоростью эмиссии носителей заряда с глубоких энергетических уровней, $F(s)$ является спектром релаксационного процесса, представляет собой целевую величину для исследований методом РСГУ. Релаксационный спектр $F(s)$

полупроводниковых структур приборного качества, имеющие небольшое количество дефектных состояний, может являться набором дискретных пиков, каждому из которых может быть отнесен в соответствие отдельное дефектное состояние в полупроводнике.

Классический метод обработки релаксационных сигналов в измерительном комплексе представлен функциями взвешивающих окон «Lock-in» и «GS-4».

$$R(\tau) = \int_0^T e(t, \tau) w(t) dt,$$

где $w(t)$ — весовая функция, T — время регистрации релаксационного сигнала, $e(t, \tau)$ — входной сигнал, в общем случае представляющий собой экспоненту либо сумму экспонент, и включающий в себя шумовую составляющую.

Взвешивающее окно «Lock-in» обеспечивает хорошее соотношение сигнал/шум и реализуется проще чем «GS-4». Взвешивающее окно «GS-4», в свою очередь, имеет худшее соотношение сигнал/шум по сравнению с «Lock-in», однако лучшее разрешение по времени релаксации.

Для повышения разрешающей способности РСГУ в измерительном комплексе был реализован метод Laplace-DLTS, основанный на применении обратного преобразования Лапласа. Использование метода требует высокого соотношения сигнал/шум в релаксационном сигнале [3].

Заключение

В данной работе представлено описание разработанного измерительно-аналитического комплекса и методов исследования электронных состояний в полупроводниковых квантово-размерными структурах, квантовых ямах и квантовых точках. Полученные результаты исследований позволяют выполнить оптимизацию параметров полупроводниковых квантово-размерных структур и их технический процесс изготовления.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина

Литература

1. Lang D. V. // J. Appl. Phys., 1974. Vol. 45. P. 3023. — URL: <http://dx.doi.org/doi/10.1063/1.1663719>.
2. Ермачихин А. В., Литвинов В. Г. // Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента, 2018. — № 2. — С. 118–123.
3. Ермачихин А. В., Воробьев Ю. В., Трусов Е. П., Литвинов В. Г. Сравнение методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней при анализе релаксационного тока // Вестник РГРТУ, Рязань, 2022. — № 4. — С. 207–217.



УДК 539.219.3

Исследование технологического процесса взаимной диффузии алюминиевого проводника и полупроводниковой подложки

Назмиев А. И.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева-КАИ
420111, Республика Татарстан, г. Казань ул. Карла Маркса, 10
kai@kai.ru*

Разработан технологический процесс взаимной диффузии алюминиевого проводника и кремниевой подложки. Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния взаимной диффузии при контакте кремний-алюминий.

Ключевые слова: диффузия; диффузионная зона; диффузионное соединение; взаимная диффузия.

С развитием приборостроения, электронной, авиационной, космической и других отраслей появилась необходимость в надежных соединениях алюминия с неметаллическими подложками. Создание надежных конструкций со стойкими эксплуатационными характеристиками требует применения качественных неразъемных соединений алюминия с неметаллами.

Совершенствование методов крепления лежит в области разработки принципиально новых технологических способов создания соединений. Таким способом является технология диффузионной сварки, имеющая ряд отличительных особенностей, благодаря которым она может быть успешно применена для получения неразъемных соединений алюминия с подложками.

В рамках работ по созданию диффузионного соединения был разработан технологический процесс взаимной диффузии между алюминием и кремнием. Для разработки технологических режимов проведены следующие исследования:

1) Выбор способа измерения температуры. Перед проведением экспериментов необходимо установить контроль над температурой, исследуемых образцов. Для этого требуется высокочастотный малоинерционный датчик, способный выдержать температурные нагрузки. Выбор пал на термопару, конструкция которого обеспечивает необходимую точность измерения в разных диапазонах температур.

2) Выбор температурного режима сварки. Из литературных источников известно, что температурный диапазон диффузионной сварки колеблется в очень широких пределах от 250 до 1050 °С.

3) Исследование взаимодействия кремния и алюминия при взаимной диффузии. При одних технологических режимах алюминий диффундирует в кремний, а при других — кремний в алюминий.

4) Исследование электрических свойств диффузионного соединения алюминий-кремний. При исследовании сопротивления установлено, что у кремниевой подложки сопротивление больше, чем у образца, полученного при контакте кремний-алюминий.

5) Расчет глубины взаимной диффузии алюминий-кремний. Установлено, что при температуре 670 ± 20 °С формируется слой взаимной диффузии глубиной 0,018 мкм.

Литература

1. Гегузин Я. Е. Диффузионная зона. — Москва, 1979.
2. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен фаз. — Москва, 1991.

УДК 533.924

Возможности атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления с источником индуктивно-связанной плазмы

Кузьменко В. О.^{1,2}, Мьяконых А. В.^{1,2}, Руденко К. В.^{1,2}¹ Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
kuzmenko@ftian.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрены возможности разработки прецизионных процессов атомно-слоевого травления для технологических задач микроэлектроники. Предложен подход к реализации процесса атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления. Исследована возможность оптимизации параметров процесса травления для достижения режима атомно-слоевого травления диэлектриков. Исследованы параметры шага модификации поверхности и активации реакции.

Ключевые слова: плазмохимическое травление; атомно-слоевое травление; диэлектрические пленки; индуктивно-связанная плазма.

Введение

С уменьшением топологических норм в производстве интегральных схем масштабируются размеры всех элементов схемы. Толщины некоторых функциональных слоев, например подзатворных диэлектриков, могут достигать нескольких нанометров. Для формирования структур в таких тонких слоях нужны процессы осаждения и травления материалов с атомной точностью. Процессы атомно-слоевого осаждения различных материалов хорошо известны, а процессы атомно-слоевого травления активно исследуются на протяжении последних десятилетий [1]. Существуют различные подходы к реализации анизотропного атомно-слоевого травления, такие как с использованием пучка ионов [2], нейтральных частиц [1], электронов [3]. Наиболее перспективным с точки зрения масштабирования, производительности и возможностей оптимизации является реализация такого процесса в установке плазмохимического травления. Известны примеры успешной реализации прецизионных процессов атомно-слоевого травления в коммерческих установках с ИСР реактором [4]. Реализация процесса атомно-слоевого травления в установке плазмохимического травления обладает преимуществом возможности масштабирования технологического процесса.

Процесс атомно-слоевого травления

Идея процесса атомно-слоевого травления (рис. 1) заключается в последовательном проведении насыщающихся реакций на поверхности травящегося функционального слоя. Процесс состоит из двух шагов, разделенных по времени шагами продувки реактора. На первом шаге на поверхности травящегося материала создается модифицированный слой, который самостоятельно не травит функциональный слой. На втором шаге реакция между модифицированным слоем и функциональным

слоем активируется за счет бомбардировки ускоренными частицами. При этом частицы не должны распылять функциональный слой, и травление должно проходить за счет активации химической реакции на поверхности.

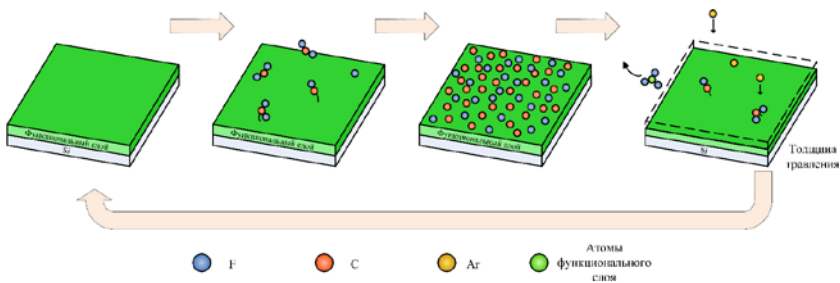


Рис. 1. Схема процесса атомно-слоевого травления

В работе рассмотрен подход к реализации атомно-слоевого травления, в котором модифицированный слой формируется на поверхности за счет осаждения фторуглеродной пленки из плазмы. Для травления пленок HfO_2 , ZrO_2 и Al_2O_3 применялась плазма $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$. Был исследован процесс взаимодействия различных составов плазмы с поверхностями HfO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 и SiO_2 . При низкой доле CF_4 в плазме на поверхностях всех исследованных материалов происходит осаждение пленки с небольшой скоростью $\sim 1,5\text{--}2$ нм/мин. С увеличением доли CF_4 на поверхностях HfO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 скорость роста пленки уменьшается, а на поверхности SiO_2 процесс осаждения сменяется травлением. Для увеличения селективности травления HfO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 к SiO_2 был выбран режим модификации поверхности в процессе атомно-слоевого травления с низким содержанием CF_4 .

При исследовании шага активации реакции ускоренными ионами Ar из плазмы было установлено, что при увеличении напряжения смещения от 10 до 20 В, существенно увеличивается спонтанное распыление материала поверхности, что приводит к значительному вкладу распыления в процесс травления. Для достижения режима травления близкого к монослойному было выбрано значения напряжения на шаге активации реакции 16 В.

Заключение

Проведено исследование подхода к реализации процесса атомно-слоевого травления диэлектриков в установке плазмохимического травления. Исследование процессов осаждения фторуглеродных пленок и активации реакции ускоренными ионами Ar позволяет добиться режима травления близкого к монослойному.

Литература

1. Park S. D., Lim W. S., Park B. J., Lee H. C., Bae J. W., Yeom G. Y. Precise Depth Control and Low-Damage Atomic-Layer Etching of HfO_2 using BCl_3 and Ar Neutral Beam // *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2008. № 11. P. H71–H73
2. Kaler S. S., Lou Q., Donnelly V. M., Economou D. J. Atomic layer etching of silicon dioxide using alternating C_4F_8 and energetic Ar^+ plasma beams // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017. № 50. P. 234001-1–234001-11.

3. Electron excitation atomic layer etch // US № 11637022 B2, 2023. / Berry III I. L., Lill T. B., Fischer A.
4. Kuzmenko V., Lebedinskij Y., Miakonkikh A., Rudenko K. Selective atomic layer etching of Al_2O_3 , AlN_x and HfO_2 in conventional ICP etching tool // Vacuum, 2023. № 207. P. 111585-1–111585-8.



УДК 537.226, 538.91, 621.793.16

ББК 22.379, 30.61/67, 32.857

PACS 31.15.A-, 61.05.cp, 68.55.J-

Элемент хранения сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти: структура и свойства

Резник А. А.^{1,2,3}, Резванов А. А.^{1,2}, Зюзин С. С.^{1,2}, Нелюбин И. В.⁴,
Поляков С. Н.⁵

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «Микрон»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

⁴ ООО «НМ-Тех»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

⁵ Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Центральная, 7а

futa006@mail.ru

Представлены результаты оригинальных исследований структуры и электрофизических свойств элемента хранения сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти (FeRAM). Проводится морфологический, фазовый и химический анализ функционального слоя $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ (HZO), а методом квантово-химического моделирования дается оценка его физических свойств.

Ключевые слова: диоксид гафния-циркония; сегнетоэлектрическая энергонезависимая память; элемент хранения; атомно-слоевое осаждение; остаточная поляризация; расчеты из первых принципов.

Введение

Диоксид гафния (HfO_2) и тройные соединения на его основе являются перспективными материалами для микроэлектроники, в частности, как основа для функционального слоя в элементе хранения (ЭХ) FeRAM [1] благодаря тому, что тонкие пленки на основе HfO_2 сохраняют сегнетоэлектрические свойства при очень малых толщинах (5–10 нм). В то же время, такие толщины могут наложить специфику в виду близости границ раздела и поэтому вопросы атомарной структуры, физических свойств функционального слоя, а также влияние различных конфигураций ЭХ на электрофизические характеристики вызывают интерес для изучения.

Модельное представление HZO

Изучение физических свойств соединения HZO проводилось в программном пакете Quantum ESPRESSO [2]. Для моделирования была выбрана элементарная ячейка HZO, состоящая из 12 атомов, в полярной орторомбической фазе $\text{Pca}2_1$. Расчет производился при значении энергии отсечки 250 Ry с сеткой Монкруста — Пака размера $3 \times 3 \times 3$. Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

После релаксации структуры проводился расчет фоновый спектр на основе теории возмущений функционала плотности, а затем в рамках квазигармонического приближения вычислялись ангармонические свойства элементарной ячейки в диапазоне температур от 0 до 800 К.

На рис. 1 представлены зависимости некоторых свойств элементарной ячейки HZO от температуры, полученные в рамках квазигармонического приближения.

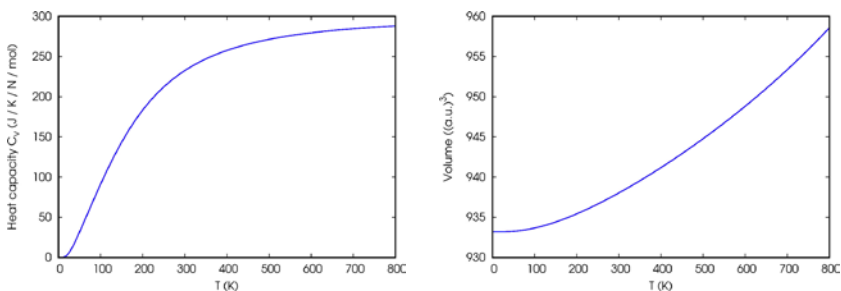


Рис. 1. Зависимость объема (справа) и теплоемкости C_v (слева) элементарной ячейки HZO от температуры

На рис. 2 изображена плотность состояний фонового спектра элементарной ячейки HZO полученная на основе теории возмущений функционала плотности.

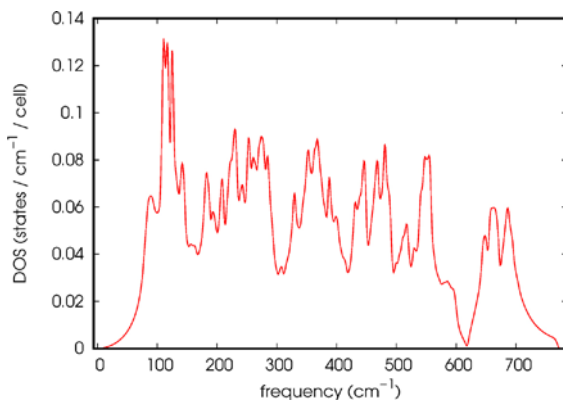


Рис. 2. Плотность состояний фонового спектра элементарной ячейки HZO

Исследование пленки HZO и ЭХ

Осаждение функционального слоя HZO проводилось на отечественной установке атомно-слоевого осаждения ИЗОФАЗ-ТМ200К [3] на электрод из нитрида титана. Полученная пленка HZO имеет неравномерность по толщине не более 1 %, а содержание Hf и Zr в пленке примерно 50 % на 50 %. Шероховатость пленки HZO по пластине не превышает 0,1 нм, что является характерным значением шероховатости

используемых для отработки процесса осаждения кремниевых пластин. Таким образом, пленка HZO растет по поверхности равномерно и полностью повторяет рельеф исходной поверхности и не привносит дополнительную шероховатость. Толщина осажденной тонкой пленки измерялись при помощи эллипсометрии. На рис. 3 представлена карта распределения толщины пленки по поверхности пластины 200 мм.

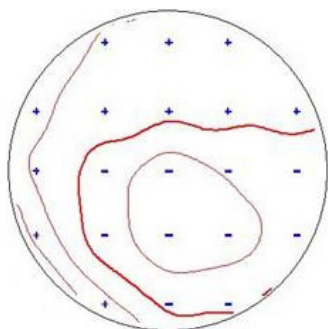


Рис. 3. Карта распределения толщины пленки на пластине диаметром 200 мм

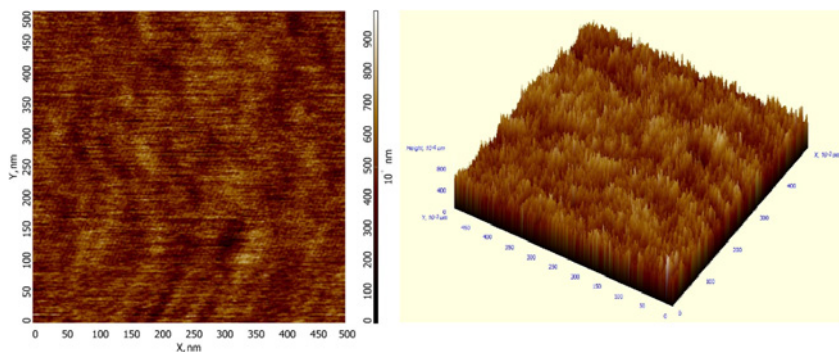


Рис. 4. Двумерная (слева) и трехмерная (справа) топографии поверхности пленки HZO

После нанесения верхнего электрода TiN и БТО исследовался фазовый состав. На рис. 5 видно, что у всех образцов после отжига можно идентифицировать пик при значении угла $30,4^\circ$ (2θ), что соответствует характерному пику орторомбической фазы (111) HZO.

Результат ЭХ измерений представлен на рис. 6. Полученные данные свидетельствуют о том, что добавление дополнительных буферных слоев из ZrO_2 между пленкой HZO и верхним/нижним электродами позволяет увеличить поляризационный отклик и увеличить время хранения заряда.

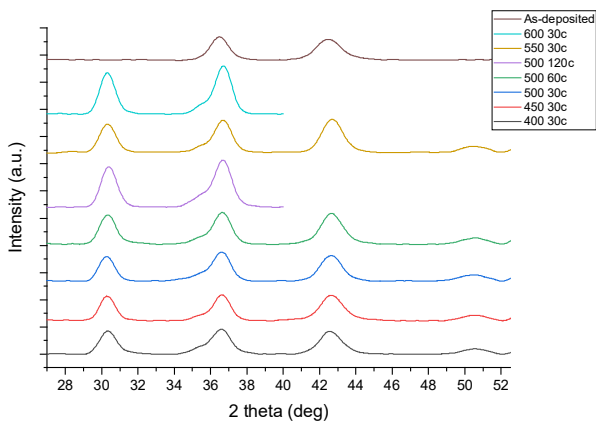


Рис. 5. Рентгенограммы тонких пленок NZO подвергшиеся быстрому термическому отжигу

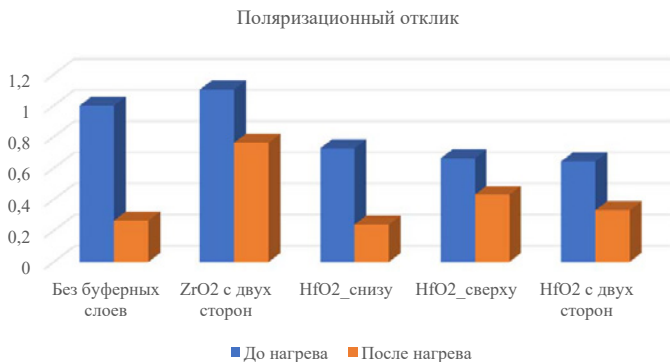


Рис. 6. Зависимость поляризационного отклика от конфигурации ЭХ

Выводы

Полученные результаты квантово-химического моделирования показали, что диоксид гафния-циркония обладает приемлемым уровнем остаточной поляризации 49,65 мкКл/см², диэлектрической проницаемости 90 и шириной запрещенной зоны 5,74 эВ.

Экспериментальные результаты показывают, что тонкие пленки, полученные на отечественной установке ИЗОФАЗ-ТМ200К, обладают хорошей равномерностью (СКО по толщине <1%), малой шероховатостью 0,1 нм и требуемым химическим составом. Отмечается зависимость температуры быстрого термического отжига на долю орторомбической фазы в тонких пленках диоксида гафния-циркония. Наличие буферного слоя из диоксида циркония улучшает показатели поляризационного отклика в ЭХ FeRAM на 10% до нагрева и в три раза после него.

Литература

1. Красников Г. Я. и др. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти типа РСМ // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — №2. — С. 38–44.
2. Giannozzi P. et al. Quantum ESPRESSO toward the exascale // The Journal of chemical physics, 2020. Vol. 152. №15.
3. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз ТМ 200-01» // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2. — С. 548–552.

УДК 546.264, 539.2

Гибридные low-k: оценка диэлектрической проницаемости, пористости и механических свойств

Цепкин М. В.^{1,2}, Резванов А. А.^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

² АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В данной работе были получены экспериментальные данные о механических и электрофизических свойствах пористых low-k диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью и с бензольными мостиковыми и терминальными метильными группами. Данные эксперимента были сопоставлены с расчетными данными и была установлена их хорошая корреляция.

Ключевые слова: low-k; диэлектрическая постоянная; моделирование параметров; мостиковые группы; терминальные группы.

Введение

В микроэлектронных схемах на этапе формирования металлизации проводники (обычно алюминий или медь) разделяются диэлектриками для изоляции. С уменьшением размеров транзисторов и увеличением плотности их упаковки на кристалле, увеличивается число слоев металлизации, а сами диэлектрики становятся очень тонкими. Это приводит к накоплению заряда и перекрестным помехам, которые негативно влияют на производительность устройства [1]. Чтобы снизить емкость и обеспечить более высокую скорость переключения, можно заменить диоксид кремния на диэлектрик с низким значением диэлектрической проницаемости такой же толщины. Эти материалы называются low-k диэлектриками [2].

Для создания интегральных схем и КМОП-устройств, диоксид кремния легко образуется на поверхности кремния путем термического окисления или может быть нанесен на поверхность с помощью газофазного осаждения или других методов формирования пленок. Относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния (SiO_2), который до сих пор используется в кремниевых чипах, составляет 3,9. Поэтому использование low-k диэлектриков положительно сказывается на снижении RC-задержек и увеличению производительности. Хотя существуют довольно широкий спектр материалов с низким значениями диэлектрической проницаемости, лишь некоторые из них могут быть интегрированы в производственный процесс [3]. В основном сложности интеграции связаны с недостаточными механическими свойствами, а также высокой степенью деградации при травлении в данных диэлектриках структур для последующего заполнения металлом.

Одним из способов снижения диэлектрической проницаемости материалов на основе оксида кремния является уменьшение их плотности путем введения искусственной пористости и добавления метильных групп для уменьшения поляризуемости ($\alpha[\text{Si}-\text{CH}_3] < \alpha[\text{Si}-\text{O}]$). Однако, интеграция пористого SiOCH связана с трудностями, такими как низкая механическая прочность и сложность интеграции с процессами травления и полировки [4]. В литературе сообщается об относительных диэлектрических константах ниже 2,0 [5], но на данный момент материалы



с такими значениями диэлектрической постоянной не были внедрены в современное производство.

Процесс расчета параметров

Целью этой работы является разработка метода расчета диэлектрической постоянной и механической прочности (модуль Юнга) в материалах SiOCH диэлектрика, в который добавляются мостиковые бензольные группы и пористость. Добавление первых потенциально должно привести к росту модуля Юнга, а добавление пористости — к снижению диэлектрической постоянной. Вариация этих двух параметров должна позволить определить оптимальный баланс между концентрацией бензольных групп и пористостью. Для верификации метода с экспериментом дополнительно были сформированы данные пленки и получены экспериментальные данные путем электрофизические и механические свойства SiOCH low-k диэлектриков имеющих мостиковые бензольные и терминальные метильные группы. Для реализации поставленной цели был использован набор различного оборудования такого как ртутный зонд, эллипсометрии для измерения параметров пор. Для определения объема пор и их распределения по размеру был использован эллипсометр. Используя полученные данные о коэффициенте связанности был вычислен модуль Юнга основываясь на корреляции данных параметров в других экспериментальных образцах.

Заключение

В результате проведенной работы были получены экспериментальные данные о механических и электрофизических свойствах диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью с бензольными мостиковыми и терминальными метильными группами, и эти данные были сопоставлены с расчетными данными.

Литература

1. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-1 (102). — С. 13–19. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.13.19. EDN ELBRSR.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2017. — №4 (168) С. 16–41. EDN ZUQSZZ.
3. Саймон М. С. (2007). Физика полупроводниковых устройств. John Wiley & Sons.
4. Rezvanov A. et al. Materials Chemistry and Physics 290 (2022) 126571
5. Хаттон Б. Д., Ландскрон К., Ханкс У. Дж., Беннетт М. Р., Шукарис Д., Перович Д. Д., Озин Д. А. (1 марта 2006). «Химия материалов для низкокристаллических материалов». Materials Today. 9 (3): 22–31.

УДК 621.3.035.22

Исследование нанесения углеродных паст на каркасы из углеволокна для электродов суперконденсаторов

Жукова Д. Н., Морозов М. В., к. т. н.*Казанский национальный исследовательский технический университет**им. А. Н. Туполева-КАИ**420111, Республика Татарстан, г. Казань ул. Карла Маркса, 10**79821160570darya@gmail.com*

В данной работе исследован процесс нанесения углеродных паст на каркасы из углеволокна. Рассмотрено влияние способа смешивания исходных веществ на структуру и электрические свойства полученных электродов. Полученные результаты могут быть использованы при создании электродов суперконденсаторов.

Ключевые слова: углеволокно; углеродные материалы; электрод; суперконденсатор.

Углеволокнистая основа представляет собой инновационный тип электродов, способных обеспечивать более эффективное и долговечное использование аккумуляторов и суперконденсаторов [1]. Особенность углеволокна заключается в его высокой степени пористости и большой поверхности, что позволяет обеспечить более эффективный обмен ионами. Важно отметить, что углерод является не только хорошим проводником, но также легким материалом, что позволяет создавать компактные и легкие суперконденсаторы. Пасты на основе углерода обладают высокой теплопроводностью, электропроводностью и механической прочностью [2].

Активная положительная масса на основе углерода для электродных токопроводящих основ аккумуляторов состоит из следующих компонентов:

1. Углеродные материалы (активированный уголь, углеродные нанотрубки, пенографит);

2. Растворитель (дистиллированная вода);

3. Связующее (поливиниловый спирт).

Для создания электродной токопроводящей основы был выбран углеродный войлок Карбопон, который имеет толщину 3 мм и радиус 0,8 мм. Этот материал представляет собой легкое несвязанное полотно, состоящее из углеродных волокон диаметром 3–15 мкм, расположенных в случайном порядке. Углеродный войлок имеет пористость в размере 94%.

В процессе исследования было приготовлено 3 пасты на основе активированного угля, активированного угля и пенографита, активированного угля и нанотрубок.

Для образца №1 смешивали измельченный активированный уголь, поливиниловый спирт в концентрации 4% от воды и к этому составу частями добавляли дистиллированную воду, предварительно нагретую до 90 °С. Далее полученный состав смешивали до полной гомогенизации смеси.

Для образца №2 смешивали активированный уголь, поливиниловый спирт в концентрации 4% от воды, пенографит в количестве 10% от массы активированного угля и к этому составу частями добавляли дистиллированную воду, предварительно нагретую до 90 °С.



Для приготовления образца № 3 смешивали дистиллированную воду, углеродные нанотрубки 10% от массы активированного угля и активированный уголь, затем помещали в ультразвуковой диспергатор УЗДН-АТ на 10 минут. Затем нагревали суспензию до температуры 90 °С и добавляли поливиниловый спирт в концентрации 4% от воды и смешивали до однородности.

Далее при помощи кисти с жесткой щетиной необходимо было равномерно вмазать ее в поверхность углевого лока, вбивающими движениями до полного покрытия и появления массы на обратной стороне электродной основы. Затем мы переворачивали образец и аналогичными движениями наносили пасту на структуру с обратной стороны. Этот метод использовался для нанесения пасты на поверхность электродной основы. После нанесения положительной активной массы на электрод, образец помещали в печь и поддерживали температуру в 80 °С в течение 1 часа. Этот процесс обеспечивал оптимальное соединение компонентов и создание прочной, стабильной структуры электрода. Затем лишнюю пасту счищали с помощью наждачной бумаги. Для оценки структуры полученных материалов использовался метод оптической микроскопии.

В процессе исследования электрического сопротивления исследуемых электродов использовался потенциостат/гальваностат AUTOLAB PGSTAT302N, а также программное обеспечение NOVA на персональном компьютере. Для оценки электрических свойств применялся метод циклической вольт-амперометрии. В процессе исследования было выяснено, что электрод с пастой на основе активированного угля (79,4%) диспергированного вместе с углеродными нанотрубками (7,9%), поливинилового спирта (12,7%) и дистиллированной воды показал самое низкое сопротивление.

Полученные результаты могут быть использованы при создании электродов суперконденсаторов.

Литература

1. Le Thi Xuan Huong. Carbon felt based-electrodes for energy and environmental applications: A review // Carbon, 2017. Vol. 122. P. 546–591.
2. Shuaijie He et al. Research Progress on Graphite-Derived Materials for Electrocatalysis in Energy Conversion and Storage // Molecules, 2022. Vol. 27. № 8644. P. 1–24.

УДК 621.315.592.9

Изменение фоточувствительности поликристаллических пленок PbTe и PbS в кислородосодержащей атмосфере

Отажонов С. М.¹, Ботиров К. А.¹, Алимов Н. Э.¹, Халилов М. М.²

¹ Ферганский государственный университет
150100, Узбекистан, г. Фергана, ул. Мураббийлар, 19
otajonov_s@mail.ru

² Ферганский филиал Ташкентского университета
информационных технологий
150118, Узбекистан, г. Фергана, улица Мустакиллик, 185

В данной работе рассмотрено влияние термообработки поликристаллических пленок PbTe и PbS полученных на разных подложках. Установлено, что при длительной термообработке знак фото-ЭДС пленок меняется на противоположный, а в длинноволновой области спектра фотопроводимость имеет небольшой максимум.

Ключевые слова: фоточувствительность; поликристаллические пленки; термообработка.

Введение

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, физические процессы, ответственные за фотоэлектрические явления, происходящие в поликристаллических пленках A_3B_6 , до сих пор остаются до конца неизученными из-за кажущейся противоречивости результатов [1–4]. Структуры и свойства межкристаллических барьеров в таких материалах также остаются неопределенными. В работах [5–6] сообщается, что кислород сосредотачивается на поверхности пленок сернистого свинца и в межкристаллитных прослойках, а в объем кристаллитов не проникает. Термообработанные пленки халькогенидов свинца по своим свойствам очень близки, и возможно поэтому они обладают неоднородным распределением примесей как по толщине слоя, так и в межкристаллитном барьере.

Методика

Методика измерения спектральной зависимости сечения захвата фотонов, фотопроводимости и фото-ЭДС применялась также к исследованию фотовольтаических свойств пленок PbS и PbTe на подложках из ситалла, поликора и SiO_2 , полученные напылением в вакууме с их последующей активацией в кислородосодержащей атмосфере.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В пленках PbTe на ситалловой подложке фото-ЭДС более чувствительна к состоянию поверхности, чем фотопроводимость. Это указывает на большую асимметрию барьеров у поверхности, образующейся во время обработки. Асимметричность барьеров имеет иной характер отношения к состоянию поверхности в пленках PbTe, нанесенных на окисленную поверхность кремния. В таких пленках наблюдается инверсия знака фото-ЭДС в области при энергии фотона 0,4 эВ.

Термообработка пленок PbS на поликоре в течение 10 и 20 мин в кислородосодержащей атмосфере приводит к изменению знака фото-ЭДС на противоположный при 0,55 эВ. Увеличение фотопроводимости начиная с 0,75 эВ может быть



обусловлено либо ударной ионизацией, либо генерацией носителей заряда из глубоких зон [7–9] или из гетеропереходов между кристаллитами и другими соединениями.

Плазменное травление приводит к исчезновению инверсии знака и увеличению фото-ЭДС, что может объясняться тем, что до травления на поверхности пленки барьеры имели противоположную полярность. При снятии тонкого слоя поверхности уменьшается вклад барьеров, дающих фото-ЭДС противоположной полярности. Оставшиеся барьеры генерируют фото-ЭДС преимущественно одной полярности, что способствует ее увеличению. Эта ситуация, по-видимому, аналогична изменениям в CdTe после обработки хлором [10].

Вывод

Таким образом, применяемая нами комплексная методика показала чувствительность к технологии изготовления и обработки слоев, что позволяет применять ее для исследования свойств пленок полупро-водниковых соединений A_3B_6 .

Литература

1. Агаев З.Ф. и др. Электрические свойства монокристаллов PbTe с избытком свинца // Физика твердого тела, 2008. — № 3. — С. 92–94.
2. Багиева Г. З. и др. Влияние структурных дефектов на теплопроводность поли- и монокристаллического PbTe // Неорганические материалы, 2012. — Т. 48. — № 8. — С. 901–904.
3. Багиева Г. З. и др. Электрические свойства монокристаллов PbTe с избытком теллура // Физика и техника полупроводников, 2011. — Т. 45. — № 11. — С. 1446–1448.
4. Вайткус Ю. Ю. и др. Влияние избытка теллура и свинца на деформационные характеристики поликристаллических пленок PbTe // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research — Андижон. Узбекистан. Vol. 3 Iss. 1. June 2021.
5. Отажонов С. М. и др. Влияние деформации на миграцию дефектов в фото-чувствительных тонких пленках CdTe: Ag и PbTe // Science and world, 2021. — № 6 (94).
6. Отажонов С. М. и др. Влияние хлора на тензосвойства тонких пленок сульфида свинца // Proceedings of the 1st International Conference Current issues and prospects for the development of scientific research. — Orléans, France. — 2021. — С. 329–334.
7. Отажонов С. М. и др. Спектры поглощения поликристаллических пленок PbTe с избытком теллура // Proceedings of the 1st International Conference Theory and practice of science. — Rome, Italy. — 2021. — С. 954–962ю
8. Akhmedov T. et al. Effective dielectric permeability and electrical conductivity of polycrystalline PbTe films with disturbed stoichiometry // Journal of Physics: Conference Series. 2131 (2021). 052008.
9. Akhmedov T. et al. Optical properties of polycrystalline films of lead telluride with distributed stoichiometry // Journal of Physics: Conference Series. 1889 (2021). 022052.
10. Dashevsky Z. et al. Thermoelectric efficiency in graded indium-doped PbTe crystals // Journal of Applied Physics, 2002. Vol. 92. № 3. P. 1425–1430.

УДК 621.315.592.9

Улучшения характеристики фотоэлементов на основе р CdTe – п CdS и р CdTe – п CdSe при термоциклировании

Отажонов С. М., Эргашев Р.

Ферганский государственный университет

150100, Узбекистан, г. Фергана, ул. Мураббийлар, 19

otajonov_s@mail.ru

В работе рассмотрено характеристики фотоэлементов созданной на основе р CdTe – п CdS и р CdTe – п CdSe при термической обработке. Установлено, что для получения наиболее устойчивой характеристики солнечных элементов наилучшие толщины слоя CdTe оказались до ~25–30 мкм.

Ключевые слова: гетеропереходы; солнечные элементы; р CdTe – п CdS; фоточувствительность; поликристаллическая пленка; рекомбинационные центры; спектральная чувствительность.

Введение

В последнее время тонкослойные технологии приобрели большое значение в связи с высокими требованиями в области современной микроэлектроники и наноэлектроники. В частности, следует отметить бурное развитие систем преобразования солнечной энергии во всем мире. В связи с этим возникает проблема поиска способов прогнозирования их стойкости и обеспечения стойкости фотоприемников и фотопреобразователей к работе при внешних воздействиях, таких как сильное световое воздействие, радиация, высокая температура и др. [1]. В последние годы наряду с другими полупроводниковыми приборами на основе соединений A_2B_6 возрастает интерес к технологическим и химико-физическим свойствам соединения CdTe наряду с арсенидами кремния и галлия. CdTe также является прямозонным полупроводником с $E_g \approx 1,5$ эВ и высоким коэффициентом поглощения. Благодаря этим свойствам слои CdTe могут эффективно поглощать кванты света в широком диапазоне солнечного излучения.

Тонкие пленки CdTe и гетероструктуры на их основе также перспективны для изготовления солнечных элементов [2–3]. Тонкие поликристаллические пленки CdTe, содержащие встроенные гетеропереходы, перспективны и для производства ячеек оптической памяти [4–6]. А также на основе гетероструктур CdTe-SiO₂-Si можно создать фотоприемники с управляемой спектральной фоточувствительностью [7], запоминающее устройства [8] и элементы памяти с управляемым временем запоминания [9].

В связи с этим в настоящей работе были исследованы пленочные гетероструктуры на основе р CdTe – п CdS и р CdTe – п CdSe и рассмотрены их вольт-амперные характеристики и термостойкость.

Результаты

Проведенные оценки показывают, что в структуре р CdTe – п CdSe при малых уровнях освещенности ток ограничивается рекомбинацией в слое объемного заряда. А при высоких уровнях освещенности в структуре р CdTe – п CdS и р CdTe – п CdSe в ток начинают вносить свой вклад диффузионные токи неосновных неравновесных носителей.



Испытания пленочных структур p CdTe – n CdS на термоциклирование проводилось на воздухе в течение 1 ч при +70 °С, затем при –50 °С также в течение 1 ч. Было проведено 270 термоциклов. Структуры p CdTe – n CdS были покрыты защитными лаками, используемыми для элементов p Cu_{2-x}Te – n CdS. Результаты испытания на термоциклирование показали, что эксплуатационные параметры пленочных структур p CdTe – n CdS после 270 термоциклов почти не изменяются.

Следует отметить, что термоциклирование улучшает природу перехода структуры p CdTe – n CdS и тем самым улучшаются вольт-амперные характеристики. Это является одним из важнейших преимуществ структуры p CdTe – n CdS перед пленочными элементами на основе системы p Cu_{2-x}S – n CdS и p Cu_{2-x}Te – n CdTe.

Вывод

Таким образом, по полученным экспериментальным результатам можно утверждать, что сформированные гетеропереходы существенно снижают влияние поверхностной рекомбинации на фоточувствительность, и спектральное распределение фоточувствительности расширяется от 0,5 мкм до 0,9 мкм.

Литература

1. Abdul K. et al. Design of a highly efficient CdTe-based dual-heterojunction solar cell with 44% predicted efficiency // Solar Energy, 2021. 221. P. 488–501.
2. Ren B. et al. High-performance visible to near-infrared photodetectors by using (Cd,Zn)Te single crystal // Optics Express, 2019. 27 (6). P. 8935.
3. Дирин Д. Н. Синтез и оптические свойства коллоидных нанокристаллов CdTe/CdSe и CdTe/CdS на основе тетраподов CdTe // Фундаментальное материаловедение и наноматериалы. — Москва, 2009.
4. Akhmedov T. et al. Optical properties of polycrystalline films of lead telluride with distributed stoichiometry // Journal of Physics: Conference Series, 2021. 1889. P. 022052.
5. Витухновский А. Г. и др. Влияние разветвления тетраподных нанокристаллических гетероструктур CdTe/CdSe на их люминесценцию // Physics Letters A, 2009. — 373 (26). — С. 2287–2290.
6. Gaubas E. et al. Study of polycrystalline CdTe films by contact and contactless pulsed photo-ionization spectroscopy // Thin Solid Films, 660. — 2018. — С. 231-235.
7. Васильев Р. Б. и др. Влияние температуры на рост коллоидных нанотетраподов CdTe // Менделеевские сообщения, 2009. — Т. 19 (3). — С. 126–127.
8. Li C. et al. Understanding individual defects in CdTe thin-film solar cells via STEM: from atomic structure to electrical activity // Mater.Sci. Semicond. Process, 2017. 65. P. 64–76.
9. Okamoto T. et al. Optical and electrical characterizations of highly efficient CdTe thin film solar cells // Thin Solid Films, 2001. 387. P. 6–10.

УДК 535.3

Особенности построения фотонных ИС тензорного сопроцессора для ускоренных нейроморфных вычислений

Сапегин А. А.¹, Марахин А. А.¹, Макаров М. Э.¹, Миннуллин Р. Т.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Дано общее описание задачи аппаратной реализации матричного умножения и преимущества ее реализации в виде фотонной интегральной схемы (ФИС). Теоретически описаны варианты реализации матрицы весовых коэффициентов фотонного тензорного сопроцессора. Выделены основные факторы, определяющие шумы и потери в ФИС тензорного сопроцессора.

Ключевые слова: фотоника; нейроморфные вычисления; тензорные процессоры; ФИС.

Введение

Замена электронных компонентов интегральных систем их оптическими функциональными аналогами является актуальной задачей, интенсивно разрабатываемой в ведущих мировых научных группах. Причина активизации таких разработок связана с постепенным достижением электронными ИС своих фундаментальных пределов [1]. В частности, разрабатываются фотонные тензорные сопроцессоры, имеющие большое прикладное значение в задачах ускоренной обработки информации с использованием нейросетевых алгоритмов, в том числе для задач потокового распознавания изображения [2]. Использование таких сопроцессоров позволяет получить существенный выигрыш в сравнении с электронными аналогами по энергоэффективности операций процессора, отнесенной к единице площади чипа [3]. Ядро фотонного тензорного сопроцессора чаще всего выполняет одну из двух задач линейной алгебры: задачу свертки или задачу матричного умножения, в соответствии с формулой

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} — элементы опорной матрицы, x_i — элементы входного вектора, y_i — элементы выходного вектора. Таким образом, для функционирования устройства в нем должен быть реализован блок задания входного вектора и блок задания матрицы весовых коэффициентов (опорной матрицы), как показано на рис. 1. При этом входной вектор чаще всего является быстро изменяемым, что приводит к высоким требованиям по частоте переключения элементов данного вектора. С учетом данных требований, основным способом задания является использование прямой лазерной модуляции или модуляции с использованием электрооптических модуляторов различного типа.

Операция №1: Построение свёрточного фильтра
Типовая задача: выделение объектов на изображении

x1	x2	x3	*	k1	k2	=	$y1 = k1*x1 + k2*x2 + k3*x4 + k4*x5$	$y2 = k1*x2 + k2*x3 + k3*x5 + k4*x6$
x4	x5	x6		k3	k4		$y3 = k1*x4 + k2*x5 + k3*x7 + k4*x8$	$y4 = k1*x5 + k2*x6 + k3*x8 + k4*x9$
x7	x8	x9						

Операция №2: Умножение матрицы на вектор
Типовая задача: линейная классификация объектов

k1	k2	k3	*	x1	=	$y1 = x1*k1 + x2*k2 + x3*k3$
k4	k5	k6		x2		$y2 = x1*k4 + x2*k5 + x3*k6$
k7	k8	k9		x3		$y3 = x1*k7 + x2*k8 + x3*k9$

Рис. 1. Типовые операции, выполняемые тензорным процессором

Варианты реализации опорной матрицы фотонного тензорного процессора

Требования к скорости переключения опорной матрицы сильно варьируются от выполняемой задачи и не всегда требуют высоких скоростей переключения. Это определяет вариативность в физической реализации опорной матрицы. В данной работе (рис. 2) рассматриваются три варианта реализации опорной матрицы: 1) реализация с использованием интерферометров Маха — Цендера, 2) реализация с использованием микрокольцевых резонаторов с термоэлектрическим управлением и 3) реализация на основе ячеек фазовой памяти (PCM, [4]) на основе халькогенидных сплавов типа GST (Ge-Sb-Te). с возможностью оптического переключения. Особенностью третьего варианта реализации является энергонезависимость задаваемых весовых коэффициентов опорной матрицы, что позволяет снизить энергозатраты при работе процессора после машинного обучения (задания весовых коэффициентов) в так называемом режиме inference («инференс»).

Оценка шумов и потеря в ФИС фотонного тензорного сопроцессора

Оценка шумов в ФИС фотонного сопроцессора важна, т. к. шумы определяют общую разрядность устройства. При этом, согласно [3] для успешной работы на классических бенчмарках для распознавания изображений, тензорный процессор должен реализовывать эффективное число бит (далее — ЭЧБ) не менее 8. При этом, шумы определяются следующими основными факторами: шумами в лазерах, шумами на неоднородностях волноводов, шумами при маршрутизации (неточность исполнения разветвителей типа 50/50), шумы модуляторов, шумами ЦАП модуляции и шумами фотодетекторов. Важно отметить, что зашумление за счет лазера, волновода и фотодетектора пренебрежимо мало по сравнению с зашумлением ЦАП интерферометра. Следовательно, технологические возможности исполнения быстродействующих высокоразрядных ЦАП оказывают сильное влияние на ЭЧБ фотонной части устройства.

Потери в ФИС, в основном, определяются следующими факторами: потерями при вводе излучения в ФИС через оптоволокно и систему ввода, потери на модуляторе, задающем входной вектор, потери в матрице опорных коэффициентов как на массиве в целом, общие волноводные потери, связанные с шероховатостью волноводов и отражением на элементах маршрутизации ФИС, потери, связанные с эффективностью

работы фотодетекторов и дополнительные потери на вывод излучения, в случае реализации линейки фотодетекторов на отдельной технологической платформе. При этом, доминирующими и требующими наибольшей оптимизации являются потери на ввод/вывод излучения и потери в матрице опорных коэффициентов.

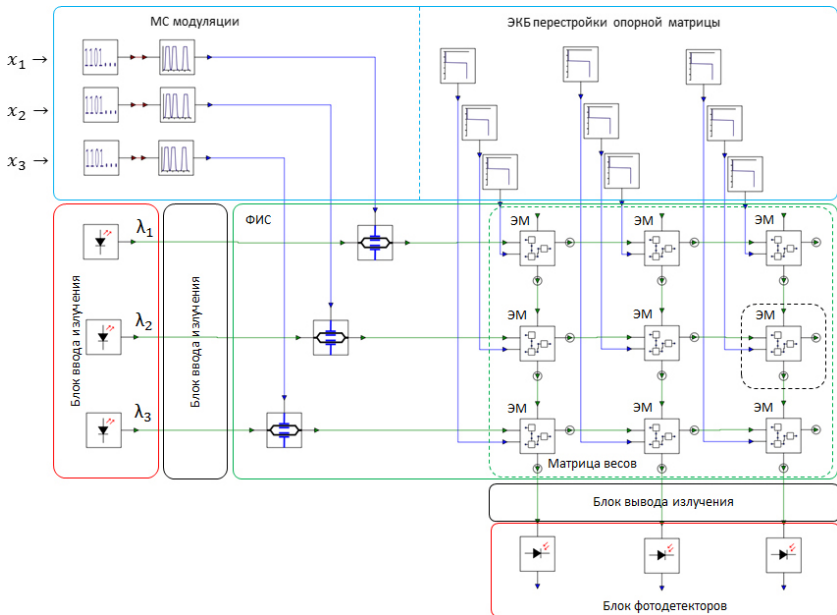


Рис. 2. Блок-схема фотонной части тензорного сопроцессора с абстрактной матрицей весовых коэффициентов. Здесь: МС модуляции — микросхема модуляции. ЭМ — элемент опорной матрицы

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»

Литература

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных меж соединений современных СБИС (Обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Feldmann J., Youngblood N., Karpov M. et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core // Nature, 2021. 589, 52–58.
3. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано-и микросистемная техника, 2015. — № 4. — С. 60–62.
4. Demirkiran Cansu et al. An Electro-Photonic System for Accelerating Deep Neural Networks. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (2023).



УДК 535.1

Полное отражение электромагнитной волны от одномерного фотонного кристалла в структуре кремний на изоляторе

Миннуллин Р. Т.^{1,2}, Барабаненков М. Ю.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
rminnullin@niime.ru² Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

В данной работе исследуется рассеяние электромагнитной волны ближнего инфракрасного диапазона на структуре, представленной одномерным фотонным кристаллом из кремниевых нитей прямоугольного сечения, расположенном на кремниевой подложке со слоем оксида кремния толщиной 2 мкм.

Ключевые слова: фотонный кристалл; рассеяние электромагнитной волны; кремниевая фотоника; интегральная фотоника.

Введение

В течение последних десятилетий обширные исследования ведутся в области нанофотоники, интегральной фотоники, и, в частности, кремниевой фотоники, что обусловлено развитием данных направлений в качестве альтернативных возможностей дальнейшего продвижения микро- и нанoeлектроники, сталкивающейся с определенными трудностями с переходом проектных норм за отметку ниже 130 нм [1]. Достижения нанофотоники находят все большие применения в областях передачи данных, оптических вычислений, био- и медицинских технологиях [2, 3].

Широкий интерес в исследовательском сообществе вызывают периодические структуры, большей частью представленные фотонными кристаллами (ФК). Фотонные кристаллы в интегральной фотонике находят применения в качестве волноводных структур [4], а также интенсивно изучаются в целях формирования метаповерхностей и метаматериалов [5], способных, благодаря их резонансным свойствам, обладать нетипичными характеристиками, такими как, например, отрицательный (или нулевой) показатель преломления.

Расчет рассеяния электромагнитной волны в подходе матричного уравнения Риккати

В данной работе исследуется структура, представляющая собой упорядоченный набор кремниевых нитей прямоугольного сечения, периодически расположенных на подложке из кремния со слоем оксида кремния толщиной 2 мкм (рис. 1а). Расположение нитей с периодом, близким по величине к длине волны падающего излучения, позволяет классифицировать структуру как фотонный кристалл, который находится в составе структуры кремний на изоляторе. Более ранние работы [6, 7], посвященные исследованию рассеяния света на фотонных кристаллах из кремниевых нитей, показали наличие в их спектрах отражения резонансных максимумов, достигающих 100%. Интересно то, что показатель заполнения таких структур составляет менее 10%. Однако, больший практический интерес

представляют структуры, которые могут быть реализованы на основе технологии кремний на изоляторе.

На рис. 1б представлена зависимость полного коэффициента отражения структуры по мощности при изменении периода расположения нитей, полученная при расчете рассеяния света в аналитическом подходе т. н. соотношений переноса в теории многократного рассеяния электромагнитной волны в неоднородной среде с применением уравнения Риккати относительно матричных волновых коэффициентов отражения [8]. Из графика видно, что при отношении λ/Λ равном $\sim 1,6$ достигается максимум отражения, составляющий 100%. Период ФК при этом составил 0,96 мкм, а плотность упаковки $\sim 21\%$. На графике ниже (рис. 1в) представлена угловая зависимость коэффициента отражения при фиксированном периоде ($\Lambda = 0,96$ мкм), а также угловые зависимости коэффициента отражения для кремниевой подложки со слоем SiO_2 толщиной 2 мкм (сплошная линия без маркеров) и для КНИ подложки (толщина верхнего слоя кремния — 220 нм, толщина SiO_2 — 2 мкм; штриховая линия). Проведенные расчеты показывают, что 98–100% отражения по мощности достигается в угловом диапазоне от -5 до 5° .

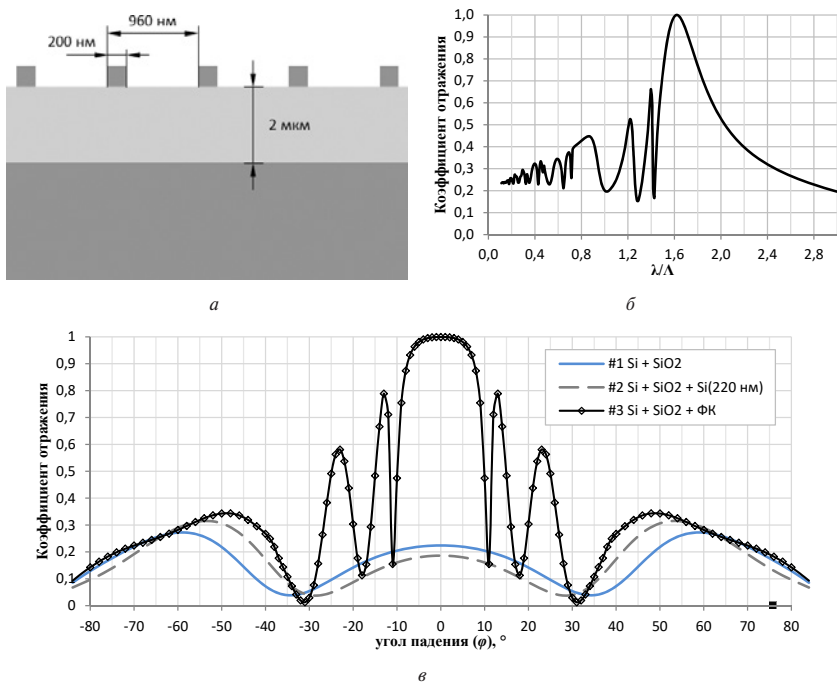


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой структуры (а); спектр отражения структуры при нормально падающем ТЕ поляризованном излучении с длиной волны 1550 нм (б); угловые спектры отражения структуры с периодом 0,96 мкм, подложки со слоем оксида (сплошная линия без маркеров) и КНИ подложки (штриховая линия) (в)

Заключение

Проведенные в работе расчеты показывают проявление полного резонансного отражения ТЕ поляризованного излучения с длиной волны 1550 нм от одномерного фотонного кристалла из кремниевых нитей с плотностью упаковки ~20% в составе структуры кремний на изоляторе. Представленное явление может быть использовано для проектирования определенных устройств нанофотоники, таких как, например, резонаторов, в частности, для вертикально излучающих лазеров, частотных фильтров или поляризаторов.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.
2. Fang Zh., Zhao C. Zh. Recent Progress in Silicon Photonics: A Review / ISRN Optics, 2012. Vol. 2012.
3. Scarella C. et al. PLAT4M: Progressing Silicon Photonics in Europe // Photonics, 2016. 3, 1.
4. Ludvigsen H. et al. Photonic crystal based integrated optics // TULE Research Program Progress Rep., 2005.
5. Khan K. et al. Optical wave propagation in photonic crystal metamaterials // Appl. Phys. A, 2014. 117, 629–634.
6. Minnullin R. T. et al. Spatial reflected and transmitted field pattern at resonant scattering of an electromagnetic plane wave on 1D diffraction gratings and photonic crystals // IEEE Xplore Digital Library, 2019. Photonics North (PN). DOI: 10.1109/PN.2019.8819543.
7. Minnullin R. T. et al., Total reflection of near infrared range wave from subwavelength silicon 1D photonic crystal with small packing density // J. Phys. Conf. Ser., 2019. 1410, 012127.
8. Barabanenkov Yu. N., Barabanenkov M. Yu. Energy Invariants to Composition Rules for Scattering and Transfer Matrices of Propagating and Evanescent Waves in Dielectric Structures // 2006 PIERS Proceedings, 2, 10–12.

УДК 544.537

Лазерная активация генерации второй гармоники нитевидных нанокристаллов кремния в гибкой мембране**Масталиева В. А.^{1,2}, Неплох В. В.^{1,3}, Айбуш А. В.⁴, Фёдоров В. В.¹, Якубова А. А.^{1,3}, Гудовских А. С.¹, Макаров С. В.⁵, Мухин И. С.^{1,3}**¹ Академический университет им. Ж. И. Алферова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3
strindberg76@mail.ru² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29⁴ Федеральный исследовательский институт химической физики
им. Н. Н. Семёнова

119334, г. Москва, Ленинский просп., 38/2

⁵ Институт точной механики и оптики

197101, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Исследована ГВГ в гибких мембранах ННК кремния и силоксана. Массивы вертикальных ННК диаметром около 80 нм и высотой 1,3 мкм продемонстрировали сигнал ГВГ при воздействии импульсного фемтосекундного лазерного излучения в инфракрасном спектральном диапазоне от 800 до 1020 нм.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы; нелинейная оптика; нанофотоника; инфракрасное излучение; вторая гармоника.

Введение

Нелинейные оптические свойства кремния были изучены в большом количестве работ [1–2], касающихся ГВГ индуцированной внешним электрическим полем в планарных волноводах и микрорезонаторах. Ранее ГВГ изучалась в планарных волноводных структурах, изготовленные стандартными методами процессирования и паттернирования тонких пленок [3], а ГВГ возникает главным образом в объемном кремнии, в котором необходимый параметр $\chi^{(2)}$ возникает при приложении внешнего электрического поля или механического напряжения. В настоящее время необходимы новые подходы, такие как использование наноразмерных структур и их использованием в составе гибких полупрозрачных корпусов.

Измерение генерации второй гармоники

Нелинейно-оптические исследования мембран Si NW/PDMS проводились с использованием лазерного сканирующего микроскопа (LSM-980, Zeiss, Германия). Внешний АОМ-порт микроскопа LSM использовался для подачи фемтосекундных лазерных импульсов (Discovery-NX, Coherent, США) со следующими характеристиками: 1) частота повторения 80 МГц; 2) длительность ~150 фс; 3) линейная поляризация. Настраиваемый диапазон длин волн 800–1020 нм для центральной длины волны импульсов был ограничен оптикой LSM.

При измерении зависимости интенсивности ВГ от мощности лазера на длине волны 920 нм обнаружено явление резкого увеличения сигнала ГВГ, которое можно назвать эффектом активации. Область, представленная на рис. 1а получена при

мощности накачки ниже пороговой, а область 1b на карте, отмеченная красным прямоугольником, соответствует области образца, ранее «активированной» при пороговом значении мощности накачки равной ~ 3 мВ.

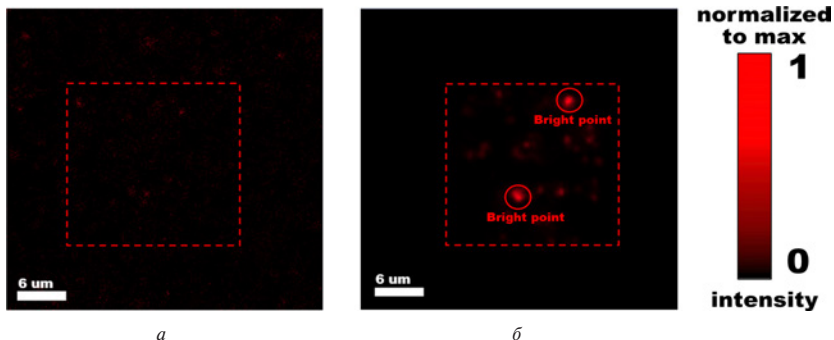


Рис. 1. Карты ГВГ для области мембраны ННК/ПДМС (а) до и (б) после лазерной активации

Таким образом, продемонстрирована усиленная ГВГ в мембранах кремниевых ННК/ПДМС. Исследован эффект активации ГВГ при достижении порогового значения мощности ИК-возбуждения.

Заключение

Продемонстрирована усиленная генерация второй гармоники в структурах мембран кремниевых ННК/ПДМС. В эксперименте обнаружен эффект облучения фемтосекундными лазерными импульсами, приводящий к значительному и необратимому увеличению сигнала ГВГ, который связан с реструктуризацией поверхностного материала и ЭВГ из-за зарядки электронных ловушек в приповерхностном слое кристалла.

Работа выполнена при поддержке РНФ 23-79-00018 «Исследование нелинейных оптических свойств Si и гибридных SiO₂/Si наноструктур для создания ИК-визуализаторов»

Литература

1. Borghi M., Bazzanella D., Mancinelli M. and Pavesi L. On the modeling of thermal and free carrier nonlinearities in silicon-on-insulator microring resonators // *Optics Express*, 2021. 29 (3). P. 4363–4377.
2. Borghi M., Biasi S. and Pavesi L. Reservoir computing based on a silicon microring and time multiplexing for binary and analog operations. arXiv preprint arXiv:2101.01664.
3. Kochetkov F. M., Neplokh V., Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Sharov V. A., Eliseev I. E. and Mukhin I. S. Fabrication and electrical study of large area free-standing membrane with embedded GaP NWs for flexible devices // *Nanotechnology*, 2020. 31 (46). 46LT01.

УДК 621.38

Учет расходимости сфокусированного лазерного пучка при оценке параметров чувствительности к одиночным радиационным эффектам

Шарапов А. А., Ватуев А. С., Емельянов В. В.

АО «Научно-исследовательский институт приборов»

140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8

AASharapov@niipribor.ru

Предложен метод учета распространения сфокусированных лазерных пучков при оценке эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ). Проанализирована необходимость учета фокусировки пучка для случаев реализации механизмов однофотонного и двухфотонного поглощения.

Ключевые слова: одиночные радиационные эффекты; лазерное излучение; двухфотонное поглощение; моделирование процесса; линейные потери энергии.

Введение

Для исследования стойкости ЭКБ к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) с применением установок на основе сфокусированного лазерного излучения (ЛИ) используются объективы высокой кратности, что требуется для создания пучков соразмерных чувствительным объемам современных микросхем. Помимо этого, для реализации механизма двухфотонного поглощения необходимо обеспечивать высокую интенсивность излучения.

Поглощение сфокусированного лазерного излучения в полупроводниках

Поглощение ЛИ веществом (изменение интенсивности) описывается уравнением:

$$\frac{dI(r, z)}{dz} = -\alpha I(r, z) - \beta_2 I^2(r, z) - \Omega_m I^m(r, z) - \sigma_{ex} n I(r, z), \quad (1)$$

где α — коэффициент однофотонного поглощения, см^{-1} ; β_2 — коэффициент двухфотонного поглощения, $\text{см}/\text{ГВ}$; I — интенсивность излучения, $\text{Дж}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$; r, z — радиальная и вертикальная координаты, см ; m — порядок оптического процесса; Ω_m — коэффициент поглощения оптического процесса m -порядка; σ_{ex} — сечение взаимодействия излучения со свободными носителями заряда.

Поглощение ЛИ приводит к генерации неравновесных носителей заряда (ННЗ). На основе расчетов пространственного распределения концентрации ННЗ проводится оценка эквивалентных ЛПЭ ЛИ.

Распространение сфокусированного пучка ЛИ в среде проиллюстрировано на рис. 1.

Зависимость размера пучка от продольной координаты может быть описана при помощи выражения:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z_0 - z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $w(z)$ — зависимость размера пучка от продольной координаты z ; z_R — Релеевская длина, мкм ; z_0 — положение фокуса, мкм ; w_0 — минимальный радиус пучка, мкм .

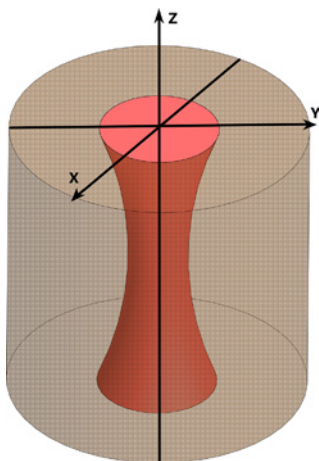


Рис. 1. Прохождение ЛБ через полупроводниковый образец

Ситуация плоскопараллельного хода лучей подразумевает под собой два принципа, не соблюдаемые при показанной на рис. 1 картине распространения излучения:

- 1) равенство пройденного фотонами пути и его проекции на продольную ось z ;
- 2) постоянная интенсивность излучения по ходу прохождения пучка при отсутствии поглощения.

В основе метода учета фокусировки пучка лежит итерационный алгоритм, который на основе заданной зависимости $w(z)$ позволяет на текущем шаге расчета распределения интенсивности $I(r, z)$ учитывать измерение размера пучка w_n относительно размера на предыдущем шаге w_{n-1} .

Обсуждение результатов, полученных с использованием предложенной модели поглощения сфокусированного ЛБ

Результаты сравнительных расчетов с применением алгоритма и без него приведены на рис. 2 и 3. При расчетах учтено, что в случае однофотонного поглощения, лазерный пучок как правило фокусируют на поверхности исследуемой микросхемы. При работе в режиме двухфотонного поглощения фокусировку осуществляют на глубине залегания чувствительного объема для локализации воздействия

Видно, что для случая однофотонного поглощения все рассчитанные зависимости нормированных значений ЛПЭ_{экв} от глубины совпадают вне зависимости от применения алгоритма и энергии импульса ЛБ, что связано с линейным характером данного оптического процесса. Можно сделать вывод, что для расчета распределения интенсивности в данном процессе достаточно применять закон Бугера — Ламберта — Бера, фактически рассматривая случай плоскопараллельного хода лучей.

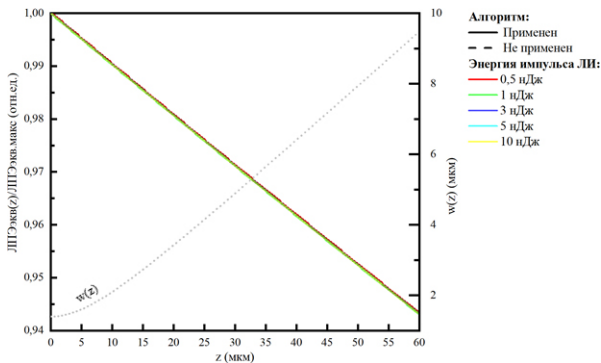


Рис. 2. Зависимость нормированных эквивалентных значений ЛПЭ_{экв} от глубины для случая реализации однофотонного поглощения

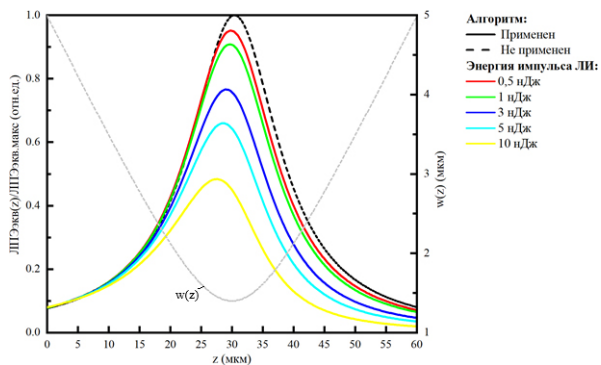


Рис. 3. Зависимость нормированных эквивалентных значений ЛПЭ_{экв} от глубины для случая реализации двухфотонного поглощения

В случае реализации процесса двухфотонного поглощения видно, что с возрастанием энергии лазерного импульса увеличивается и разница между результатами, полученными с применением предложенного алгоритма и без, а также наблюдается сдвиг пика ЛПЭ_{экв} в область меньшей глубины. Данные результаты можно связать с нелинейностью (зависимостью поглощения от интенсивности) процесса двухфотонного поглощения, что делает актуальным применение предложенного метода учета расходимости сфокусированного пучка.

Важно подчеркнуть также, что зависимости, приведенные на рис. 2 и 3, корректны только при условии того, что размер пучка ЛИ не превосходит размер чувствительной области.

УДК 681.7.068.4

**Высокоразрешающие волоконно-оптические элементы
для техники ночного видения последнего поколения**

Кастуев М. К., Гусалов А. И.

ООО ВТЦ «Баспик»

362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, корп. 6

В докладе освещены новейшие разработки ООО Владикавказского технологического центра «Баспик» в области волоконной оптики. Представлены новейшие разрабатываемые волоконно-оптические элементы с описанием их технических характеристик и сфер применения.

Ключевые слова: волоконно-оптические преобразователи (ВОП); волоконная оптика.

В настоящее время отечественный и мировой рынок испытывает большую потребность в волоконно-оптических элементах в связи с быстрыми темпами развития техники ночного видения. Основными конкурирующими параметрами являются разрешение и светопропускание ВОЭ. Перспективы усовершенствования параметров ВОЭ будут развиваться в основном в части улучшения характеристик для создания высокоразрешающих волоконно-оптических преобразователей для электронно-оптических преобразователей третьего поколения.

В докладе сделан акцент на возможность и крайнюю необходимость импортозамещения в области жестких волоконно-оптических элементов, а также необходимой материально-технической базы для их крупносерийного производства.

Литература

1. Zhao Ran, Zhou You, Wei Dong, Wang Yun, Fu Yang, Wang Jiuwang. A high-resolution optical-fiber imaging sensor // Proc. SPIE 11340, AOPC 2019: Optical Fiber Sensors and Communication, 1134007 (18 December 2019). DOI: 10.1117/12.2539016.
2. Петровский Г.Т. и др. Исследование неоднородности и совместимости пар стекол для коммуникационных-волоконных световодов и волоконно-оптических элементов // ЖПХ, 1980. — № 6.
3. Pan Jingsheng, Lv Jingwen, Zheng Tao, Liu Wenwei, Xu Wei, Sun Jianning, Su Detan, Design and fabrication of a fiber optic image inverter based on a new high numerical aperture fiber optic glasses system. November 2010 Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering 7850:5. DOI: 10.1117/12.868259.
4. Jiao P., Jia J., Fu Y., Zhang L., Wang Y., Wang J., Zhou Y., Shi P., Zhao R., Huang Y. Detection of blemish for fiber-optic imaging elements / May 2020 Optical Engineering 59(05):1. DOI: 10.1117/1.OE.59.5.053105.

УДК 535.3

Использование гребневых волноводов для уменьшения неравномерности потерь мультиплексора на основе массива волноводов

Бабичек И. В.^{1,2}, Сапегин А. А.²¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

babichek.iv@phystech.edu

Рассмотрены известные конструкции тэйперов для AWG спектрометра, позволяющие уменьшить неравномерность потерь выходных каналов. Предложена и проанализирована новая структура на основе волноводов разной высоты.

Ключевые слова: массив волноводов; флэт-топ; фотоника; тэйпер; конус; рупор; спектр.

Введение

Четвертая промышленная революция продолжается [1]. Развитие нейронных сетей и так называемого Интернета вещей требуют увеличения пропускной способности каналов связи, а дальнейшее повышение производительности электронных систем приводит к увеличению энергопотребления [2]. Поэтому в настоящее время исследуются новые методы обработки и передачи данных, особенно с использованием носителей информации, отличных от электронов, в целях поддержания прогнозируемой законом Мура скорости развития [3]. Это является причиной появления интегральной фотоники — отрасли науки, которая использует свет в качестве носителя информации для построения микросхем.

Оптический мультиплексор — один из ключевых компонентов интегральной фотоники, делит сигнал по длине волны или объединяет сигналы с разными длинами волн в один. Один из видов мультиплексоров — роутер на основе массива волноводов. Он незаменим в системах оптической маршрутизации для центров обработки данных и высокопроизводительных компьютеров [4, 5]. Такое устройство использует весь частотный диапазон между двумя порядками дифракции (между двумя пиками на одном канале), позволяя сделать N^2 соединений, используя только N длин волн. Для данного применения становится важным обеспечение одинаковой величины потерь для каждого выходного канала или, так называемое понижение *неравномерности*.

Компенсация неравно мерности

Причиной потерь излучения является искажение пятна фокусировки, которое попадает в выходной волновод, и снижение его интенсивности согласно диаграмме направленности излучения волновода массива. Идеальной диаграммой направленности является прямоугольная функция, то есть, постоянная интенсивность в определенном угле. Диаграмма направленности или изображение в дальнем поле связана с полем на выходе волновода массива преобразованием Фурье.



Как известно, Фурье образ прямоугольной функции — это $\frac{\sin x}{x} \equiv \text{sinc}(x)$, поэтому желательно образовать поле такого профиля на поверхности массива, причем чем больше период $\text{sinc}(x)$, тем больше ширина ступеньки.

В литературе для обеспечения такого излучения различными способами вводят связь полей в соседних волноводах массива [6, 7]. Часть энергии поля, распространяющаяся в соседних волноводах, играет роль вторичных пиков функции $\text{sinc}(x)$.

В данной работе исследуется возможность внедрения участка перехода в гребневый волновод в конце массива. Это позволяет управлять связью между соседними волноводами, которая контролируется толщиной гребневого слоя, и уменьшить связь волны с волноводом, что уменьшит потери [8]. Предлагается две конструкции — связывающий регион из двух пересекающихся эллипсов в глубине массива и стандартные тэйперы на выходе из массива или половина структуры (левая половина) в роли тех же тэйперов.

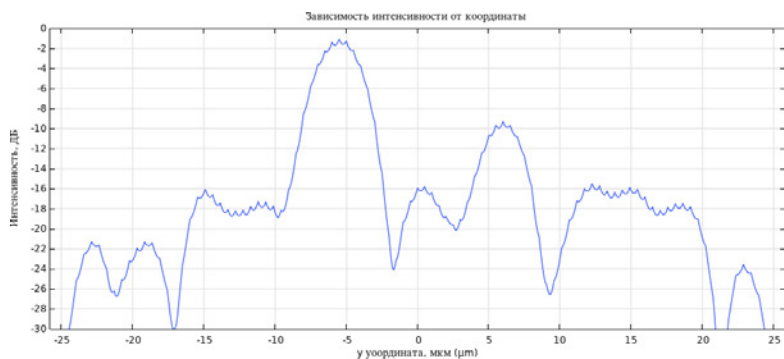


Рис. 1. Распределение интенсивности на выходе структуры в логарифмическом масштабе

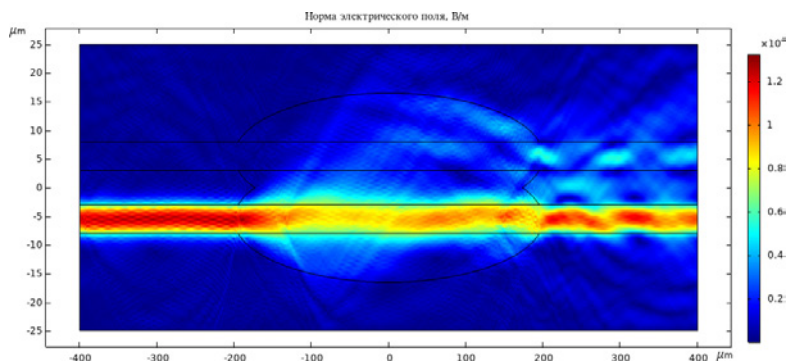


Рис. 2. Прохождение света через структуру

В COMSOL Multiphysics была смоделирована структура из 5×5 мкм волновода с показателями преломления 1,448 и 1, 1,46972. Тэйперы имели форму эллипса с высотой 1,7 мкм и полуосями 200 и 8 мкм. Структура вносит 2 ДБ потерь в основной волновод, а в соседнем пиковая интенсивность составляет около 30% от основного, что пока не является достаточным для реализации похожей на sinc формы поля, т. к. для него необходимо 40–50% [6]. Также фоновая засветка излучающих мод находится на высоком уровне –18 ДБ. Из-за этого использование структуры в роли тэйперов на выходе из массива не представляется возможным.

Заключение

Предложена новая структура для компенсации неравномерности потерь в AWGR. В результате моделирования получены низкие потери в основном канале. Однако, на данном этапе структура вносит большие потери на излучение, что требует дальнейшей доработки модели.

Литература

1. Schwab K. The fourth industrial revolution // Currency, 2017.
2. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — Т. 102. — № 1. — С. 2.
3. Wang Z. et al. Integrated nanophotonics for «More than Moore»: дис. — 2017.
4. Proietti R. et al. Experimental demonstration of a 64-port wavelength routing thin-CLOS system for data center switching architectures // Journal of Optical Communications and Networking, 2018. Vol. 10. № 7. P. B49–B57.
5. Grani P. et al. Flat-topology high-throughput compute node with AWGR-based optical-interconnects // Journal of Lightwave Technology, 2016. Vol. 34. № 12. P. 2959–2968.
6. Chen Y. et al. Uniform-loss cyclic arrayed waveguide grating router using a mode-field converter based on a slab coupler and auxiliary waveguides // Optics Letters, 2019. Vol. 44. № 2. P. 211–214.
7. Song G. et al. Silicon-based cyclic arrayed waveguide grating routers with improved loss uniformity // Optics Communications, 2018. Vol. 427. P. 628–634.
8. Smit M. K., Van Dam C. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 1996. Vol. 2. № 2. P. 236–250.



УДК 538.958

Исследование дисперсий нанотрубок на нелинейно-оптические свойства для ограничения ИК излучения ближнего диапазона и защиты светочувствительных сенсоров и органов зрения

Гончарова А. В., Василевский П. Н.²¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

agoncharova@niime.ru

Представлены результаты исследования нелинейных свойств дисперсий одностенных углеродных нанотрубок OCSiAl при облучении квазинепрерывным фемтосекундным Ti:Sapphire лазером. Представлены результаты расчета нелинейно-оптических характеристик сред и предложена модель ограничителя лазерного излучения для сенсорной защиты.

Ключевые слова: оптический ограничитель излучения; фемтосекундное излучение; углеродные нанотрубки.

В настоящее значительное количество разнообразных лазерных установок работают в видимом диапазоне спектра, с тенденцией возрастания интенсивности излучения в широком диапазоне. Фокусировка лазерного излучения на глазном дне может привести к повреждениям пигментных структур сетчатки, лазерным ожогам и в конечном счете к слепоте [1]. Материалы с нелинейно-оптическими свойствами находят применение в качестве ограничителей излучения для защиты зрения и светочувствительных датчиков и потенциально могут использоваться для решения задач по технологии проектирования чувствительных элементов сенсоров, а также в технологических процесса изготовления микроэлектроники [2].

Жидкостные системы ограничения излучения имеют неоспоримое преимущество перед твердотельными лимитерами, в силу того, что последние утрачивают свои свойства в зоне воздействия без возможности последующего самовосстановления. Однако окрашенность жидкостных систем вызывает ошибки идентификации, в перспективе разработки системы для защиты зрения [3–5]. Поэтому актуальная задача повышения поиска цветонейтральных, быстродействующих и стойких лимитирующих материалов [6].

В данной работе представлены результаты исследования нелинейно-оптических свойств жидких дисперсий углеродных нанотрубок в трех растворителях: вода, диметилсульфоксид (ДМСО) и диметилформамид (ДМФА), на трех длинах волн: 720, 800 и 900 нм. При облучении дисперсии наблюдается расширение луча, которое при превышении порогового значения приобретает кольцевую структуру, что свидетельствует о проявлении эффекта пространственной фазовой самомодуляции.

Рассчитаны значения нелинейного показателя преломления. Наилучшие характеристики показала дисперсия ОУНТ + ДМСО, $n_2 = 0,68 \pm 0,09 \text{ см}^2/\text{МВт}$, что позволяет сделать вывод о применимости ее для ограничения излучения с высокой

частотой повторения импульсов. ОУНТ + вода проявляет слабый нелинейный эффект и не отвечает критерию быстродействия.

Предложена схема ограничения излучения. Методом с фиксированным положением образца определены значения прошедшей мощности и получена зависимость мощности лазерного излучения, прошедшей через образец, от падающей. Рассчитан коэффициент ослабления дисперсии ОУНТ + ДМСО, $K_{Omax} = 17$ отн. ед. Анализ показывает, что нормированное пропускание образца уменьшается с увеличением значений мощности излучения, процент прошедшего излучения снижается. За счет перехода от постоянного коэффициента пропускания к нелинейному возникает эффект ограничения мощности излучения, что в перспективе может быть применимо в качестве жидкостного ограничителя для защиты светочувствительных систем. Полученные зависимости могут охарактеризовать поведение среды при взаимодействии с излучением различной мощности.

Литература

1. Chen Y. et al. Graphene and its derivatives for laser protection // Progress in Materials Science, 2016. Vol. 84. P. 118–157.
2. Захаров Н. А., Бокарев В. П., Горнев Е. С., Нечипоренко А. П. Влияние углеродных нанотрубок на кристаллизацию и свойства наноразмерного гидроксипатита кальция // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2019. — № 1 (173). — С. 55–60. EDN HOU GXF.
3. Yüksek M. et al. The nonlinear refraction and absorption dependence on the thermal effect for 4 ns pulse duration in binuclear Zn (II) phthalocyanine solution // Optics communications, 2008. Vol. 281. № 14. P. 3897–3901.
4. Vandewal K., Benduhn J., Nikolis V. C. How to determine optical gaps and voltage losses in organic photovoltaic materials // Sustainable Energy & Fuels, 2018. Vol. 2. № 3. P. 538–544.
5. Ahmad Shah N. A. et al. The Study of Platinum Coated Carbon Nanotubes as Third-Order Nonlinear Optical Materials // Solid State Phenomena. — Trans Tech Publications Ltd, 2021. Vol. 317. P. 166–172.
6. Копылова Т. Н. и др. Ограничитель интенсивности лазерного излучения на основе полиметиновых красителей // Квантовая электроника, 2006. — Т. 36. — № 3. — С. 274–279.

УДК 621.39

Особенности конструкции оптических разветвителя и их влияние на выходные параметры

Крылов А. А.^{1,2}, Скуратов И. Д.^{1,2}, Светиков В. В.^{3,4}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
example@gmail.com² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9³ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38⁴ АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Основываясь на результатах серии вычислительных анализов, было проведено сравнение между четырьмя конструкциями, представленными в полной работе. В ходе этого сравнения был выбран и демонстрируется оптимальный дизайн.

Ключевые слова: оптический разветвитель; оптическое разветвление; интегральная фотоника; моделирование.

Введение

Основным и важным звеном в распространении фотонов на кристалле является интегральный оптический разветвитель. Разветвление луча имеет большое значение для эффективного использования источников и компактной интеграции оптоэлектронных устройств. Он широко используется при разделении мощности, разделении поляризации, мультиплексировании с разделением длин волн и других сценариях [1].

Описание работы

В этой работе мы представляем вычислительный анализ коэффициента разветвления и вносимых потерь для четырех различных конструкций оптических разветвителей. Конструкции разветвителей были следующими: Y-образный разветвитель, MMI-разветвитель, гибридный разветвитель MMI-Y-разветвитель и гибридный разветвитель MMI-Y-разветвитель с перемычками для уменьшения оптических утечек. Конструкция последнего разветвителя основана на гибридном разветвителе MMI-Y-образном разветвителе с перемычками между ветвями в местах наибольших оптических утечек для сохранения излучения в конструкции (рис. 1) [2]. Это позволяет снизить потери в разветвителе. Вычислительный анализ выполняется следующим образом: топологические параметры разветвителя, которые включают длину ветви разветвителя, ширину и длину MMI, а также смещение ответвления от центра, варьируются для построения зависимости мощности выходного поля. Оптимальная топология достигается при достижении максимальной мощности поля. Пример результата такого моделирования для выбора оптимальной точки для ширины MMI и начального смещения ответвления можно увидеть на рис. 2.

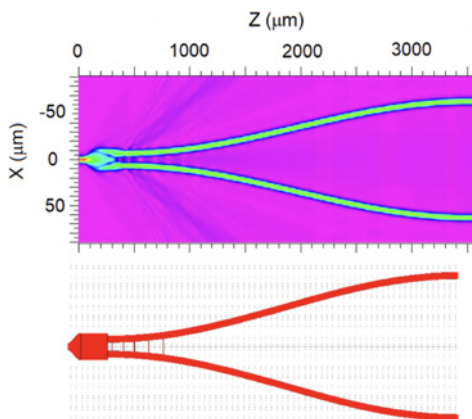


Рис. 1. MMI — MMI-Y-разветвитель с перемычками для уменьшения оптических утечек и распространение поля в нем

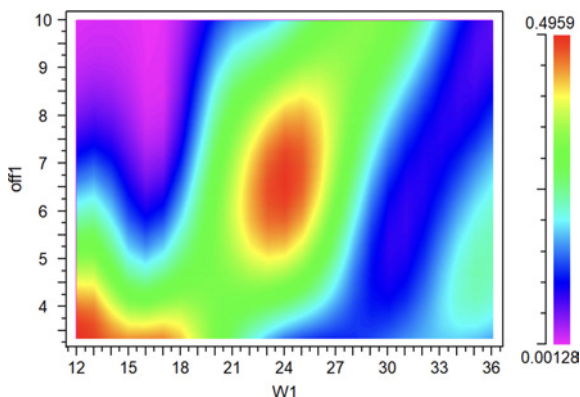


Рис. 2. Результат серии симуляций. Зависимость величины поля в одной из ветвей разветвителя в зависимости от ширины MMI и смещения ветви от центра

Заключение

В ходе исследования было получено, что гибридный разветвитель MMI-Y-разветвитель и гибридный разветвитель MMI-Y-разветвитель с перемычками для уменьшения оптических утечек позволяет эффективно разветвлять луч при меньших линейных размерах в сравнении с Y-образным разветвителем.

Литература

1. Xu Y. et al. Methods and applications of on-chip beam splitting: A review // *Frontiers in Physics*, 2022. Vol. 10. P. 985208.

2. Ticknor A.J. et al. Planar lightwave circuit optical splitter / mixer — U.S. Patent and Trademark Office, US, 2018 / 0299617 A1.
3. Zhang Y., Yang S., Lim A. E. J., Lo G. Q., Galland C., Baehr-Jones T. and Hochberg M. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide // *Optics express*, 2013. Vol. 21. № 1. P. 1310–1316.
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. уровни описания технологии // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*, 2017. — № 1

УДК 535.18, 621.372.8

Исследование и анализ нелинейно-оптических эффектов в кремниевых щелевых волноводных структурах

Мурзагалина С. М.^{1,2,3}, Скуратов И. Д.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
murzagalina.sm@phystech.edu

Работа посвящена изучению нелинейных явлений в щелевых кремниевых волноводах, а также в гибридных полимерных структурах. Показано, что возможно уменьшение потерь мощности света за счет компенсации ограничений, налагаемых нелинейностями второго и третьего порядка в Si. Построенная модель щелевого волновода анализируется с использованием следующих вычислительных методов: метода конечных элементов, метода конечных разностей во временной области, а также метода сингулярных возмущений.

Ключевые слова: нелинейная оптика; легированные полимеры; щелевой волновод.

Введение

Кремниевая технологическая база обладает большим потенциалом при интеграции электроники, фотоники и квантовых технологий. Она выступает в качестве решения для удовлетворения растущих потребностей в таких приложениях, как обработка данных и телекоммуникационная промышленность. Используя линейные оптические явления, на платформе SOI было реализовано значительное количество устройств, например оптические буферы, межсоединения [1] и датчики.

Нелинейности второго и третьего порядка приводят к потерям оптической мощности, но в то же время нелинейно-оптические эффекты предоставляют доступ к новым применениям, таким как мультиплексирование и модуляция сигналов. Поэтому исследователи сталкиваются с новой задачей — создать устройство с минимальными потерями и наилучшими функциональными характеристиками.

Материалы и методы

Нелинейность второго порядка в кремнии ниже из-за centrosymmetric кристаллической структуры, в то время как нелинейность третьего порядка высока и вызвана такими эффектами, как двухфотонное поглощение, вынужденное рассеяние, четырехволновое смешение и эффект Керра. Для решения этой проблемы был проведен анализ различных материалов, среди которых кремнийорганические гибриды (SON), которые также обладают сильными нелинейностями второго и третьего порядка [2]. На распространение оптического излучения в волноводных структурах влияют как свойства кремния, так и SON-материалов [3].

Нелинейный показатель преломления n_{NL} и восприимчивость третьего порядка $\chi^{(3)}$ связаны следующим образом:

$$n_{NL} = \text{Re}(\chi^{(3)}) / (4\epsilon_0 c n_1^2),$$

где ϵ_0 и c — диэлектрическая проницаемость и скорость света в вакууме, а n_L — линейный показатель преломления исследуемого материала. Для полимера Ormosoge нелинейный показатель преломления равен $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$, в то время как для Si он равен $6 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$.

Нелинейные характеристики материалов				
Материал	$\lambda[\text{nm}]$	n	$n_2[\text{m}^2/\text{W}]$	FoM
Si	1500	3,48	$6 \cdot 10^{-18}$	0,86
SiO ₂	1550	1,46	$2,5 \cdot 10^{-20}$	10
As ₄₀ Se ₆₀	1550	2,81	$2,3 \cdot 10^{-17}$	11
Ormoscore	1550	1,7	$2 \cdot 10^{-17}$	~ 5

Рис. 1. Обзор анализируемых материалов и их нелинейные характеристики

Двухфотонное поглощение (ТРА) является одной из наиболее значимых причин потерь мощности. Таким образом, для увеличения эффективности устройства необходимо снизить его влияние. Функция годности (FOM) связывает нелинейный фазовый сдвиг с соответствующим изменением интенсивности и определяется как:

$$FOM = \frac{1}{\lambda} \frac{n_{NL}}{\alpha_{NL}},$$

где $\alpha_{NL}(\lambda)$ — коэффициент нелинейного поглощения. Для кремния характерен высокий нелинейный показатель n_{NL} , но, в то же время и высокий коэффициент поглощения, связанный с двухфотонным поглощением в структуре, что заметно снижает FOM, а SiO₂ обладает слабыми нелинейными характеристиками. С другой стороны, полимер Ormosoge демонстрирует как большой нелинейный индекс n_{NL} , так и небольшой нелинейный коэффициент поглощения α_{NL} , что приводит к хорошему FOM.

Чтобы получить максимальную нелинейность в шелевых волноводах, необходимо оптимизировать не только показатель преломления, зависящий от материала, но и ограничение мод. Параметр нелинейности равен:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_{NL}}{A_{\text{eff}}^{(3)}}.$$

Параметр нелинейности γ зависит от эффективной области нелинейных взаимодействий третьего порядка $A_{\text{eff}}^{(3)}$. Для структуры кремниевого шелевого волновода (рис. 2а) $A_{\text{eff}}^{(3)}$ меньше $0,1 \text{ мкм}^2$ может быть получена при таких геометрических параметрах, как ширина щели 50 нм, ширина направляющих волноводов 180 нм и их высота 350 нм. Уникальное преимущество шелевой волноводной структуры заключается в том, что она концентрирует поле внутри щели, как показано на (рис. 2б), так что нелинейности в кремниевом материале становятся менее важными, а материал щели определяет нелинейное поведение.

Данная конфигурация способна обеспечить новые применения, такие как оптический захват, оптическое переключение и конструирование оптических сенсоров. Для этого волноводы покрываются легированным полимером или другими органическими веществами, такими как полимер Отмосоге, в которых демонстрируются нелинейности как второго, так и третьего порядка. Такие волноводы являются хорошими кандидатами для электрооптических модуляторов с высокими скоростями передачи данных и устройств обработки оптических сигналов [4]. Исследуемые устройства обладают такими преимуществами, как высокая эффективность и интеграция с новыми материалами, совместимыми с КМОП.

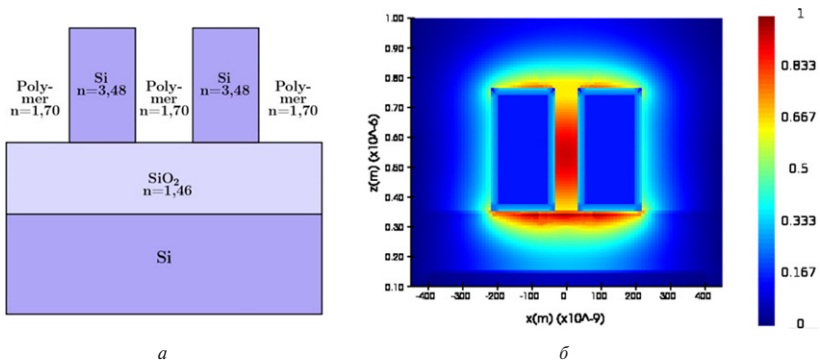


Рис. 2. Структура шелевого волновода в поперечном сечении (а) и профиль распространяемой моды (б)

Анализ данной структуры проводится с использованием программного обеспечения для моделирования, основанного на методе конечных элементов (FEM) и методе конечных разностей во временной области (FDTD). Чтобы минимизировать оптические потери, было решено оптимизировать геометрические параметры модели с использованием методов машинного обучения. Также рассматривается аналитический подход к получению параметров шелевого волновода с нелинейными характеристиками с использованием метода сингулярных возмущений (SPT). SPT используется для изучения поведения волноводов с пространственными возмущениями [5] и слабыми нелинейностями второго и третьего порядка, что приводит к решениям с достаточно высокой точностью [6].

Литература

1. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
2. Leuthold J. et al. Silicon Organic Hybrid Technology — A Platform for Practical Non-linear Optics // Proceedings of the IEEE, 2009. Vol. 97. № 7. P. 1304–1316. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2016849.
3. Lipson M. et al. Guiding, modulating, and emitting light on Silicon—challenges and opportunities // Journal of Lightwave Technology, 2005. Vol. 23. № 12. P. 4222–4238. DOI: 10.1109/JLT.2005.858225.

4. Palmer R. et al. Low power Mach–Zehnder modulator in silicon-organic hybrid technology // *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013. Vol. 25. № 13. P. 1226–1229.
5. Nayfeh A. H., Asfar O. R. Parallel-plate waveguide with sinusoidally perturbed boundaries // *Journal of Applied Physics*, 1974. Vol. 45. № 11. P. 4797–4800.
6. Yokota M. et al. Guided transverse-magnetic waves supported by a weakly nonlinear slab waveguide // *JOSA B*, 1993. Vol. 10. № 6. P. 1096–1101.

УДК 621.383

Исследование фазового сдвига в волноводах с халькогенидными стеклами

Митрофанова А. Е.^{1,2}¹ АО «НИИМЭ»124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
amitrofanova@niime.ru² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе представлено численное моделирование распространения волноводной моды в волноводе с пленками из халькогенидных стекол, численный анализ изменения фазы волноводной моды в зависимости от фазового состояния халькогенидного стекла и геометрических параметров структуры.

Ключевые слова: интегральная фотоника; халькогенидные стекла; сдвиг фазы.

Введение

В настоящее время халькогенидные материалы широко используются для создания ячеек памяти. Такие устройства основаны на принципе изменения оптических и электрических свойств при изменении фазового состояния стекла с аморфного на кристаллическое. Особое внимание уделяется исследованию стекол Ge–Sb–Te (GST), которые обладают высоким оптическим контрастом [1] и коротким временем переключения фазового состояния (<50 мс) [2]. Это позволяет рассмотреть возможность использования тонких пленок GST-225 (Ge₂Sb₂Te₅) в оптических устройствах переключения. GST-225 обладает высоким показателем преломления как в аморфном ($n = 4,69$), так и в кристаллическом ($n = 8,03$) фазовых состояниях [3, 4].

Анализ свойств структуры с тонким слоем халькогенидного стекла

В ходе работы была исследована возможность создания дискретного набега фазы с использованием элементов на основе тонких пленок GST-225. Основной задачей работы стал поиск оптимальной геометрии волновода с тонкой пленкой GST, которая будет обеспечивать необходимый набег фазы и минимизирует потери на поглощение в слое GST. При расположении слоя GST непосредственно на поверхности волновода происходит быстрый (на длине порядка 0,1 мкм) переход излучения в слой GST. Для предотвращения этого использован буферный слой, который расположен между волноводом и тонкой пленкой. Тогда слой GST «захватывает» только край моды, что позволяет предотвратить перетекание всего излучения в тонкий слой и понизить потери. Итоговая геометрия структуры и распределение поля в плоскости поперечного сечения волновода представлена на рис. 1.

В работе представлены результаты численного анализа изменения фазы волноводной моды и потерь в волноводе в зависимости от фазового состояния пленки GST и геометрических параметров структуры: толщины пленки (10–30 нм) и толщины буферного слоя (0–100 нм). Для поставленной задачи был выбран буферный слой толщиной 75 нм, т. к. при утолщении слоя сильно падает получаемый сдвиг при незначительно уменьшающихся потерях. В более тонком слое начинается сильный рост потерь, что не позволяет реализовать итоговую модель интерферометра.

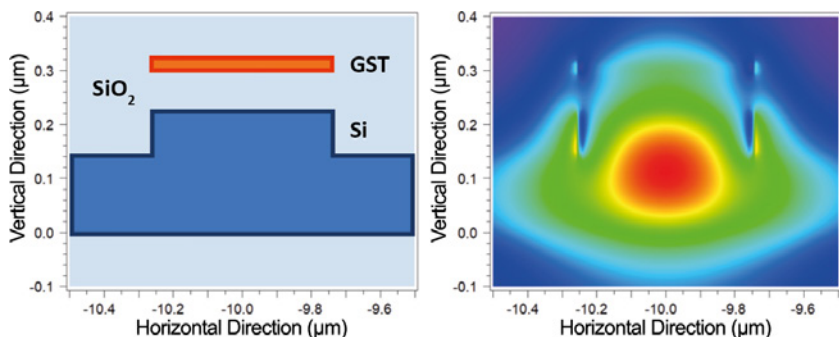


Рис. 1. Геометрия волновода и распределение поля в волноводе

На основе полученных результатов создана модель переключателя на основе интерферометра Маха — Цендера. Для работы переключателя необходимо наличие разности фаз в 45° между сигналами, распространяющимися в разных плечах. Однако создание точной разности фаз является затруднительным, т. к. это требует разности оптического пути между двумя каналами всего в $\lambda/8$, что в случае длины волны $\lambda = 1,55$ мкм составляет порядка 0,2 мкм. Для реализации подстройки в обоих плечах интерферометра созданы дискретные участки с пленкой GST. За счет изменения фазового состояния GST возможно изменять поворот фазы на $5\text{--}15^\circ$, достигая точной итоговой разности фаз в 45° , необходимой для работы переключателя.

Заключение

С помощью математического моделирования проведен анализ эффективности структур с различной толщиной буферного слоя и выбрана оптимальная геометрия. Исследована зависимость фазового сдвига и потерь в волноводах в зависимости от толщины буферного слоя между волноводом и тонкой пленкой GST. Показано, что из-за особенностей распространения света в предлагаемой структуре идеальная ширина буферного слоя составляет 75 нм. Это позволяет достичь наибольшего фазового сдвига с наименьшими потерями в области, содержащей участки пленки GST в кристаллической фазе. На основе полученных результатов создана модель оптического переключателя на основе интерферометра Маха — Цендера с настраиваемым дискретным фазовым сдвигом.

Литература

1. Guo P., Sarangan A. M., Agha I. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators // Applied sciences, 2019. Vol. 9. № 3. P. 530.
2. Козюхин С. А. и др. Материалы фазовой памяти и их применение // Russian Chemical Reviews, 2022. Vol. 91. P. 9.
3. Красников Г. Я. и др. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти типа PCM // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 38–44.
4. Kim H. J. et al., PCM-net: a refractive index database of chalcogenide phase change materials for tunable nanophotonic device modelling // Journal of Physics: Photonics, 2021. Vol. 3. № 2. P. 024008.

УДК 538.9

Нелинейно-оптическая диагностика и управление нетривиальными состояниями намагниченности в доменной структуре тонких магнитных пленок

Степанов М. А.¹, Гуськов А. А.¹, Митетелю Н. В.^{1,2}, Пятаков А. П.^{1,2},
Мишина Е. Д.¹

¹ МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

² МГУ им. М. В. Ломоносова
199991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Методом нелинейно-оптической микроскопии с разрешением по поляризации было исследовано распределение вектора намагниченности в пленке феррит-граната с субволновым разрешением и определены основные свойства доменных границ, характеризующихся неоднородным распределением намагниченности и выраженной склонностью к магнитоэлектрическому взаимодействию. Для исследованных областей продемонстрирована возможность управления положением и размерами области с нетривиальным распределением намагниченности при помощи внешних воздействий: постоянного внешнего электрического поля, неоднородной механической деформации и лазерного излучения с высокой пиковой интенсивностью.

Ключевые слова: магнитоиндуцированная вторая оптическая гармоника; нелинейно-оптическая микроскопия; доменная граница; магнитоэлектрический эффект; флексомагнитный эффект; полностью оптическое переключение.

В последнее время наибольший интерес представляют структуры, в которых наблюдается взаимодействие магнитной и электрической подсистем — так называемые «мультиферроики». Этот класс материалов позволяет создавать устройства с новыми свойствами, в которых представляется возможным реализовать запись и одновременную обработку информации с высокой энергоэффективностью. Подобными свойствами, в частности, обладают магнитные пленки с доменной структурой. Так, в области доменной границы субмикронного размера «неелевского» (безвихревого) типа возникает спонтанная электрическая поляризация. Вследствие данного эффекта возможна реализация управления микромагнитной структурой при помощи внешних воздействий [1], требующего малых затрат энергии и позволяющего создать новый класс вычислительных устройств и устройств для хранения информации.

Для разработки и создания новых устройств, основанных на управлении параметрами доменной границей (в первую очередь размерами и положением) необходимо подробно исследовать распределение вектора намагниченности в интересующих областях и определить типы внешних воздействий, способных взаимодействовать с локализованной в этой области электрической поляризацией. В нашей работе представлены результаты исследования микромагнитной структуры и нетривиальных состояний намагниченности для пленки феррит-граната с редкоземельным металлом состава $(\text{BiLu})_5(\text{FeGa})_3\text{O}_{12}$ с (210)-симметрией (полученной



методом эпитаксиального роста на подложке $Gd_3Ga_5O_{12}$). Определение ориентации вектора намагниченности в области доменной границы проводилось с использованием метода нелинейно-оптической микроскопии с разрешением по поляризации и нелинейного магнитооптического эффекта Фохта [2]. Изучение поляризационных характеристик сигнала магнитоиндуцированной второй гармоники вместе с его зависимостью от внешнего магнитного поля позволило разработать метод визуализации латеральной и перпендикулярной компоненты намагниченности. Данный метод позволил определить наличие и свойства неоднородного распределения намагниченности в области доменной границы с субволновым разрешением (до 250 нм). Также были продемонстрированы способы управления доменной границей тремя разными методами:

- притягивание-отталкивание доменных границ с различной киральностью с помощью постоянного внешнего электрического поля напряженностью до 10 кВ/см,
- смещение границ и зарождение цилиндрических монодоменных состояний при изменении параметров решетки при неоднородной механической деформации [3],
- при взаимодействии с фемтосекундным лазерным излучением различной поляризацией с пиковой интенсивностью до 500 МВт/см²

Продемонстрированные результаты позволяют говорить о возможности изменения подобных структур в новых энергоэффективных вычислительных и запоминающих устройствах микроэлектроники, в том числе с возможностью полностью оптической обработки данных

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования РФ
(грант № 075-15-2022- 1131)*

Литература

1. Pyatakov A. P. et al. Micromagnetism and topological defects in magnetoelectric media // Physics-Uspekhi, 2015. Vol. 58. № 10.
2. Cherifi-Hertel S. et al. Non-Ising and chiral ferroelectric domain walls revealed by nonlinear optical microscopy // Nature communications, 2017. Vol. 8. № 1.
3. Каминский А. С., Мясников Н. В., Пятаков А. П. К механизму магнитоэлектрических явлений в пленках ферритов-гранатов // Физика металлов и металлургия, 2023. — № 2. — С. 190–195.

УДК 53.043

Управление нелинейным сдвигом частоты прецессии намагниченности спинтронного осциллятора при помощи внешнего магнитного поля

Матвеев А. А.^{1,3}, Сафин А. Р.^{1,2}, Никитов С. А.^{1,3}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

² Московский энергетический институт
(национальный исследовательский университет)
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

³ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Нелинейный сдвиг частоты прецессии намагниченности спинтронного осциллятора, динамика которого возбуждается спин-поляризованным током, при приложении внешнего магнитного поля исследуется методом гамильтонова формализма и при помощи микромагнитного моделирования. Найдены условия наблюдения нулевого сдвига частоты прецессии намагниченности при изменении плотности спин-поляризованного тока.

Ключевые слова: спинтронный осциллятор; спин-поляризованный ток; внешнее магнитное поле; автоколебания.

Введение

Благодаря эффекту переноса спина пропускание через магнитные пленки спин-поляризованного тока позволяет возбуждать в них автоколебательную прецессию намагниченности [1]. На основе этого эффекта разрабатываются такие спинтронные устройства, как магнитные логические элементы, спин-трансферные наногенераторы, элементы магнитной памяти [1, 2]. Мощность и частота такого осциллятора зависят от выбора величины плотности спин-поляризованного тока, пропускаемого через магнетик [3]. Управление видом зависимости частоты спин-трансферного осциллятора от плотности спин-поляризованного тока возможно при помощи постоянного внешнего магнитного поля [3]. С точки зрения технических приложений актуальной является задача исследования влияния модуля и ориентации вектора напряженности внешнего магнитного поля на эту частоту.

Нелинейный сдвиг частоты прецессии намагниченности спинтронного осциллятора

Динамика намагниченности в тонкой магнитной пленке может быть описана нелинейным уравнением относительно комплексной амплитуды c , характеризующей амплитуду прецессии намагниченности. Это уравнение имеет вид [3]

$$\frac{dc}{dt} = -i\omega(|c|^2)c - \Gamma_0(|c|^2)c + \Gamma_j(|c|^2)c.$$

Здесь $\omega(|c|^2) = \omega_0 + N|c|^2$ — частота прецессии намагниченности спин-трансферного наноосциллятора с собственной частотой ω_0 , $\Gamma_0(|c|^2)c$ — слагаемое,

отвечающее за нелинейное затухание и имеющее гильбертову природу, слагаемое $\Gamma_j(|c|^2)c$ определяет накачку за счет пропуска через магнетик спин-поляризованного тока. Из формулы для частоты $\omega(|c|^2)$ видно, что нелинейный сдвиг определяется коэффициентом N , выражение для которого, с учетом одноосной и кубической магнитных анизотропий, найдено в данной работе. На рис. 1 представлены зависимости N от внеплоскостного угла Θ_0 вектора внешнего магнитного поля H_0 . Видно, что не только величина, но и знак сдвига частоты управляем при помощи угла Θ_0 . Сравнение с микромагнитным моделированием, проведенным при помощи программного пакета MUMAX³ [4], верифицирует полученные теоретические результаты.

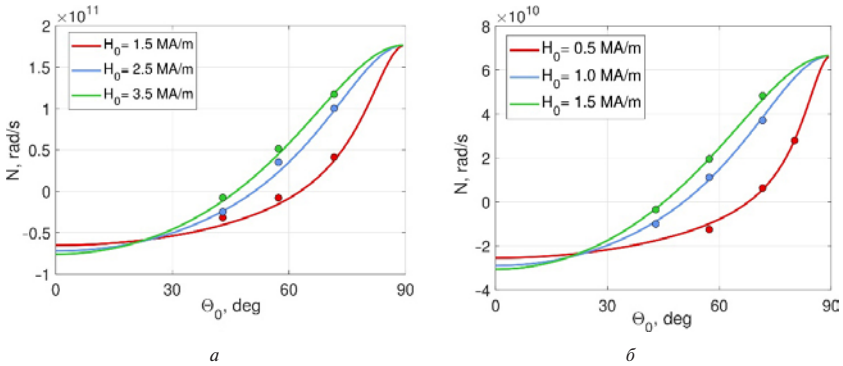


Рис. 1. Зависимости нелинейного сдвига частоты от внеплоскостного угла внешнего магнитного поля Θ_0 для пермаллоя (а) и LSMO (б). Сплошные линии построены по полученным аналитическим формулам, а круги отражают результаты микромагнитного моделирования

Заключение

В данной работе найдены выражения для коэффициента нелинейного сдвига частоты прецессии намагниченности спин-трансферного наноосциллятора. Теоретически полученные соотношения проверены микромагнитным моделированием. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перестраиваемых спинтронных осцилляторов.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства РФ для научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых, проект № 075-15-2022-1098

Литература

1. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилюк А. И. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // УФ, 2020. — С. 1009–1040.
2. Звездин К. А., Чиненков М. Ю., Попков А. Ф., Дюжев Н. А., Звездин А. К. Спинный транспорт и перспектива спинтронных наноосцилляторов // Инженерная физика, 2012. — № 10. — С. 27–44.

3. Slavin A. N., Tiberkevich V.S. Excitation of Spin Waves by Spin-Polarized Current in Magnetic Nano-Structures // IEEE Transactions on Magnetic, 2008. № 7. P. 1916–1927.
4. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., García-Sánchez F., Van B. Waeyenberge The design and verification of MuMax3 // AIP Advance, 2014. № 10. P. 107133.

УДК 538.97

Использование метода высокоэнергетической рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с возбуждением в режиме стоячих волн для исследования устройств наноэлектроники

Сизых Н. А., Зенкевич А. В.

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
sizykh.na@phystech.edu

В работе продемонстрированы возможности метода высокоэнергетической рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с возбуждением в режиме стоячих волн для выяснения электронных и химических свойств с разрешением по глубине в многослойных структурах на примере исследования границы раздела $W/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ в наноразмерном сегнетоэлектрическом конденсаторе, представляющим функциональную часть устройств энергонезависимой памяти.

Ключевые слова: HAXPES; стоячие волны; сегнетоэлектрики; устройства энергонезависимой памяти; FERAM; границы раздела; захороненные слои; взаимное расположение электронных зон.

Работоспособность и характеристики современных устройств наноэлектроники все больше определяются свойствами границ раздела в многослойных функциональных структурах. С этой точки зрения интересна возможность селективно получать информацию о взаимном расположении электронных зон на границах раздела функционального слоя и металла в сегнетоэлектрических конденсаторах, которые являются основой перспективного класса устройств энергонезависимой памяти. При этом, особый интерес представляет анализ в режиме *in operando* [1], что может позволить исследовать взаимосвязь электронной структуры границы раздела и характеристиками прототипов устройств памяти, такими как ресурс перезаписи и время хранения информации. Другим примером может служить возможность определения химического состава с атомарным разрешением на границах раздела в таких системах, как многослойные рентгеновские зеркала [2]. Детальное знание химического состава и толщин переходных слоев в этом случае может позволить упростить работу по достижению требуемых отражающих свойств. В связи с этим, особую ценность имеют те методы анализа, которые дают возможность исследования свойств непосредственно на границах раздела с разрешением по глубине. Проблема заключается в том, что большинство существующих методов либо не обладают достаточной селективностью по глубине и на требуемых характерных толщинах, либо же модифицируют как отдельные слои, так и всю исследуемую структуру. Для исследования электронных и химических свойств многослойных структур обычно применяется послойный анализ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), который является поверхностно-чувствительным методом и потому в случае, если необходимо исследование захороненных слоев, требует использования ионного травления, а следовательно, приводит к модификации химической структуры. Другим методом для анализа состава наноразмерных слоев

в многослойных структурах является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) поперечного сечения. При этом, для выяснения элементного состава используется встроенная система энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX, от *англ. Energy-dispersive X-ray spectroscopy*), который имеет ограниченное пространственное разрешение. В этой связи особое место занимает метод высокоэнергетической рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с возбуждением в режиме стоячих волн (SW-HAXPES, от *англ. Standing Wave Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy*), однако для его реализации требуется яркий, стабильный и высокомонокроматичный источник рентгеновского излучения с энергией 3–9 кэВ. В качестве такого источника на данный момент может выступать исключительно источник синхротронного излучения. В работе описываются подробности постановки эксперимента, включая выбор углов вблизи полного отражения, обеспечивающих формирование периодической структуры стоячих рентгеновских волн в исследуемой системе. Описаны особенности обработки экспериментальных данных на примере исследования границы раздела $W/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$, приводится алгоритм, позволяющий получить соответствие между углами, на которых происходит сбор фотоэлектронного сигнала, и реальной областью локализации данного сигнала по глубине исследуемого образца. Для моделирования зеркального отражения рентгеновского излучения и соответствующих стоячих волн применяется пакет X-RAY STEPANOV TER_SL1 [3]. Дополнительно обсуждаются возможности метода, касающиеся восстановления профиля распределения электрического потенциала внутри функционального сегнетоэлектрического слоя.

Литература

1. Matveyev Y. et al. Polarization-dependent electric potential distribution across nanoscale ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ in functional memory capacitors // *Nanoscale*, 2019. Vol. 11. № 42. P. 19814–19822.
2. Yang S. H. et al. Making use of x-ray optical effects in photoelectron-, Auger electron-, and x-ray emission spectroscopies: Total reflection, standing-wave excitation, and resonant effects // *J. Appl. Phys.*, 2013. Vol. 113. № 7. P. 073513.
3. Stepanov S. TER_sl on the Web. X-ray specular reflection from multilayers with rough interfaces at grazing incidence, X-Ray Serv. (2016). http://xserver.gmca.aps.anl.gov/TER_sl.html.

УДК 621.383

Синтез и исследование низкоразмерных структур для фотодетекторов ИК-диапазона

Рымжина А. Р.¹, д. ф.-м. н. Павельев В. С.^{1,2}, Ph.D Трипати Н.¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С. П. Королева

443086, г. Самара, Московское ш., 34

rymzhina.ar@ssau.ru

² ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151

Проведен анализ гибких фотодетекторов на основе чистых и функционализированных нитратом серебра наноллистов TiS_2 . Характеристики фотодетекторов определены при их освещении ИК-лазером. Продемонстрировано превосходство фотодетектора на основе функционализированных нитратом серебра наноллистов TiS_2 .

Ключевые слова: фотодетектор; халькогениды переходных металлов; наноллисты TiS_2 ; инфракрасное излучение; диэлектрофорез; химический транспорт; функционализация.

Фотодетектор — ключевой компонент многих ежедневно используемых устройств. Фотодетекторы используются в химии, медицине, спектроскопии, биохимии, контроле окружающей среды, робототехнике и т. д. [1–3].

Сегодня крайне быстро развивается потребность в гибких фотодетекторах для носимой электроники и летательных аппаратов [1]. Преимущественно используемые чувствительные элементы основаны на кристаллических эпитаксиальных материалах. Фотодетекторы на их основе жесткие и хрупкие.

Большая часть известных материалов для гибких фотодетекторов обладает ограниченными спектральными диапазонами чувствительности (<1 мкм), низким откликом и низкой скоростью отклика, что препятствует их практическому применению. В настоящее время ведутся активные исследования дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) для разработки ИК-детекторов с улучшенными характеристиками фотодетектирования. Причиной такого интереса к ДПМ стал ряд их преимуществ по сравнению с другими материалами для фотодетектирования. Так, толщина величиной в несколько атомов делает такие материалы почти прозрачными, что может быть использовано в текстиле с внедрением электроники. Такая малая толщина также отвечает за эффекты размерного квантования. Основные проблемы уже используемых материалов: узкий рабочий диапазон длин волн, малое поглощение в ИК-диапазоне спектра, жесткость изготавливаемых фотодетекторов, большое время отклика [4].

Для преодоления упомянутых проблем необходимо исследовать новые материалы для фотодетектирования. Одним из перспективных материалов для разработки гибких ИК-детекторов является дисульфид титана (TiS_2). Главным образом, интерес к данному материалу возник из-за величины его прямой ширины запрещенной зоны [4]. Она находится в диапазоне от 0,2 до 0,9 эВ, что свидетельствует о ее зависимости от структуры и о возможности поглощать излучение

в ИК-диапазоне [5]. Кроме того, процесс изготовления устройств на основе ДПП преимущественно осуществляется методом механического отшелушивания.

В данной работе проведен анализ гибких фотодетекторов на основе чистых и функционализированных нитратом серебра наноллистов TiS_2 . Наноллисты TiS_2 синтезированы методом химического транспорта, обработаны ультразвуком и осаждены методом диэлектрофореза между контактами на поверхности гибкой подложки из полиэтилентерефталата. Характеристики фотодетекторов были определены при их освещении 1064 нм ИК-лазером с перестраиваемой мощностью. Фотодетектор на основе функционализированных наноллистов TiS_2 обладает значительно более высокими характеристиками по сравнению с фотодетектором на основе чистых наноллистов TiS_2 . Данный фотодетектор показывает малое время отклика ($0,23 \pm 0,01$ с) и восстановления ($0,49 \pm 0,02$ с), высокую чувствительность (260 ± 7 кА/Вт), квантовую эффективность (303 ± 8 кА/Вт·нм) и обнаружительную способность ($31 \pm 0,9$ ТДжонс) при плотности мощности излучения 11,6 мВт. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и оптимизации современных оптоэлектронных устройств.

Литература

1. Segev-Bar M., Haick H. Flexible sensors based on nanoparticles // *ACS Nano*, 2013. Vol. 7. № 7 (10). P. 8366–8378.
2. Xie M., Hisano K., Zhu M., Toyoshi T., Pan M., Okada S., Tsutsumi O., Kawamura S., Bowen C. Flexible multi-functional sensors for wearable and robotic applications // *Advanced Materials Technologies*, 2019. Vol. 4. P. 1800626.
3. Yang Y., Deng Z. D. Stretchable sensors for environmental monitoring // *Applied Physics Reviews*, 2019. Vol. 6. P. 011309.
4. Rymzhina A., Sharma P., Pavelyev V., Mishra P., Tripathi N. Recent trends in the fabrication of photodetectors: A detailed analysis on the photodetection properties of new 2D-TMCs // *Materials Today Communications*, 2023. Vol. 35. P. 106247.
5. Sherrell P. C., Sharda K., Grotta C., Ranalli J., Sokolikova M. S., Pesci F. M., Palczynski P., Bemmer V. L., Mattevi C. Thickness-dependent characterization of chemically exfoliated TiS_2 nanosheets // *ACS Omega*, 2018. Vol. 3. № 8. P. 8655–8662.

УДК 621.372.82.2.2

Принципиальный подход к развитию 3D-НАНОЭЛЕКТРОНИКИ на основе оптических внутриаппаратных интерфейсов и радиальных цилиндрических структур

Одинцов В.Л.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева-КАИ
420111, Республика Татарстан, г. Казань ул. Карла Маркса, 10
kai@kai.ru*

В докладе на принципиальной основе обсуждается новое направление в наноэлектронике, открывающее возможность создания трехмерных интегральных устройств с высоким быстродействием, энергоэффективностью и большим количеством межэлементных связей за счет применения оптических внутриаппаратных интерфейсов. Ключевой базовой ячейкой, для построения элементов 3D-наноэлектроники, представляются нанотрубки, среди которых особо выделяются синтетические радиальные цилиндрические структуры, как позволяющие получить широкий спектр электронных свойств.

Ключевые слова: наноэлектроника; оптический интерфейс; диэлектрические нанотрубки.

За последние десятилетия интегральные технологии, включая микроэлектронику и наноэлектронику, столкнулись с серьезными вызовами и ограничениями. Эти технологии олицетворяли собой многие достижения в области электроники, но их планарная архитектура и принципы разработки выработали свой потенциал, что привело к требованиям новых технологических решений. В этом докладе мы рассмотрим основные вызовы, с которыми сталкиваются интегральные технологии и новые идеи и инновации, которые могут представлять собой ключ к их преодолению.

Часть 1: Инновации в трехмерных электронных устройствах

Количество связей между элементами в плоских интегральных схемах весьма ограничено. Этот аспект оказывает ограничивающее воздействие на развитие систем искусственного интеллекта. Преодоление этой проблемы возможно путем перехода к трехмерным электронным устройствам.

Трехмерные устройства позволяют резко увеличить плотность связей между элементами, которые могут быть размещены в трехмерном объеме, а не ограничены плоскостью. Это обстоятельство является принципиально важным для разработки систем искусственного интеллекта. Кроме того, трехмерные устройства могут быть реализованы с использованием различных материалов и технологий, что расширяет возможности для инноваций в этой области.

Часть 2: Проблемы с Запоминающими Устройствами и Их Решение

Время опроса больших запоминающих устройств (ЗУ) с огромным объемом памяти становится недопустимо большим. С другой стороны, при разделении ЗУ на множество частей с параллельным опросом, как это используется в настоящее время,

резко возрастают размеры электронных устройств. Это критично, особенно в приложениях, таких как интеллектуальные системы вооружений.

Эта проблема также может быть решена с помощью трехмерных электронных устройств. Сферические ЗУ с оптическим каналом типа «общая шина» позволяют одновременно и увеличить плотность хранения данных и резко сократить время доступа к ним. Это открывает новые перспективы для создания более компактных и производительных информационных систем.

Часть 3: Оптические Интерфейсы и Нанотрубки

При переходе к трехмерным устройствам важную роль в решении проблем с передачей данных между элементами играют внутриаппаратные оптические интерфейсы. В этом контексте нанотрубки могут быть использованы в качестве коллиматоров, что позволяет эффективно фокусировать оптическое излучение внутри устройств.

Трехмерный монтаж блоков и устройств осуществляется из элементов на основе нанотрубок автоматически с помощью программ распознавания образов. Для нанотрубок можно использовать различные методы синтеза, однако электронные свойства нанотрубок зависят от их структуры. Ни один метод синтеза не обеспечивает строго монофазный продукт, поэтому требуется автоматический отбор подходящих нанотрубок в поле электронного микроскопа с использованием программ распознавания образов.

Кроме того, использование радиальных нанотрубок в качестве основы элементной базы открывает широкие перспективы для варьирования электронных свойств нанозаполнителей.

Заключение

Интегральные технологии находятся на перекрестке вызовов и инноваций. Переход к трехмерным устройствам и использование нанотрубок как основы элементной базы и в оптических интерфейсах, а также радиальных нанотрубок представляют собой перспективные подходы для решения современных проблем и развития новых поколений информационных систем и устройств. Эти инновации могут существенно повлиять на будущее электроники и технологий.

Литература

1. Figovsky O., Nasyrov I., Khalitov Z., Valeeva D. Structure and Diffraction by Radial Cylindrical Crystals: Two-Dimensional Case. Scientific Israel — Technological Advantages, 2012. Vol. 14. P. 79–86.
2. Figovsky O., Pashin D., Khalitov Z., Semenov E. The distribution of short-wave radiation in an internal hole of nanotube. Chemistry & Chemical Technology, 2012. Vol. 6. P. 257–262.

УДК 621.382.32

Влияние температуры на статистические характеристики и параметры мощных МОП-транзисторов

Хлынов П. А.¹, Самбурский Л. М.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики)*

*123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru*

² *Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3*

Рассмотрено влияние температуры на статистические характеристики и параметры мощных МОП-транзисторов на примере IRF610. Проанализированы и описаны зависимости разброса параметров от температуры. Предложена методика учета данного эффекта в температурно-зависимых моделях МОПТ и приведены примеры схемотехнического моделирования.

Ключевые слова: МОП-транзисторы; разброс параметров; влияние температуры; моделирование.

Введение

Мощные транзисторы в составе электронных устройств нередко предназначены для работы в широком диапазоне температуры. Кроме того, во время работы с большими значениями токов, на данных элементах рассеивается большая мощность, что может приводить к саморазогреву. Разброс параметров транзисторов, вызванный неидеальностью технологического процесса, отражается в разбросе характеристик транзисторов из одной партии при одинаковых условиях [1]. Итоговый разброс характеристик компонентов может привести к ошибкам или даже к отказу электронных устройств в целом [2]. Проблема исследования и анализа влияния температурных эффектов на разброс параметров мощных МОП-транзисторов и их учет в SPICE-моделях отражена в имеющейся литературе недостаточно. Например, в работе [3] сделан анализ и классификация методов измерения ВАХ полупроводниковых приборов, выделены наиболее эффективные методы измерения с учетом саморазогрева, а в работе [2] приведены аналогичные результаты для зарубежной ЭКБ. Необходима дополнительная работа для уточнения методов и средств измерения электрических характеристик, обработки и анализа результатов измерений, учета разброса схемных характеристик с учетом температуры.

Влияние температуры на статистические характеристики и параметры мощных МОП-транзисторов

Разброс статистических характеристик и параметров исследовался на примере малой партии из 5 МОП-транзисторов IRF610. Измерения проводились в автоматизированном режиме [4] в диапазоне температуры (–40, 0, 25, 40, 80, 120 °С), с компенсацией внутреннего саморазогрева транзисторов. На рис. 1 приведен пример полученных данных для внешней температуры 80 °С.

Из рис. 1 видно, что различие между характеристиками увеличивается с ростом протекающего тока. Данный разброс связан с различием параметров отдельных компонентов в партии транзисторов. Был проведен статистический анализ

измеренных значений, по результатам которого были рассчитаны: вариация для выбранных параметров транзистора и его ВАХ. На рис. 2 показана зависимость коэффициента вариации для выбранных параметров партии исследованных МОПТ: тока насыщения (I_{dsat}), порогового напряжения (v_{to}) и крутизны сток-затворной характеристики транзистора (k_p) — от температуры с помощью коэффициента вариации. По графикам видно, что при низких значениях температуры коэффициент вариации параметров очень мал ($<1\%$), однако с ростом температуры до 120°C он увеличивается до $\sim 5\%$. Характер роста — слабый экспоненциальный; зависимости для параметров v_{to} и k_p при практических расчетах могут быть сведены к линейным с температурными коэффициентами $0,025$ и $0,04\%/^\circ\text{C}$, соответственно.

Учет разброса параметров тестовых МОПТ при схемотехническом моделировании

Полученные температурные зависимости разброса выбранных параметров исследованной партии транзисторов были внедрены в стандартную SPICE-модель MODPEX [5], которая была модифицирована для учета эффекта саморазогрева в присутствии корпуса и радиатора за счет использования электро-тепловой аналогии. Экстракция параметров модели проводилась по полученной усредненной ВАХ в программном комплексе IC-CAP.

С использованием стандартного метода Монте-Карло был промоделирован разброс электрических характеристик в диапазоне температуры ($-40\dots+120^\circ\text{C}$) для нескольких типичных схемных фрагментов на основе мощных МОПТ: логического ключа, усилительного каскада, дифференциального усилителя и др. По сравнению с цифровыми, такие схемные фрагменты существенно более чувствительны к значениям и изменениям параметров элементов, и на них больше сказывается точность описания статических и динамических характеристик транзисторов. На рис. 3 представлен результат моделирования АЧХ усилителя.

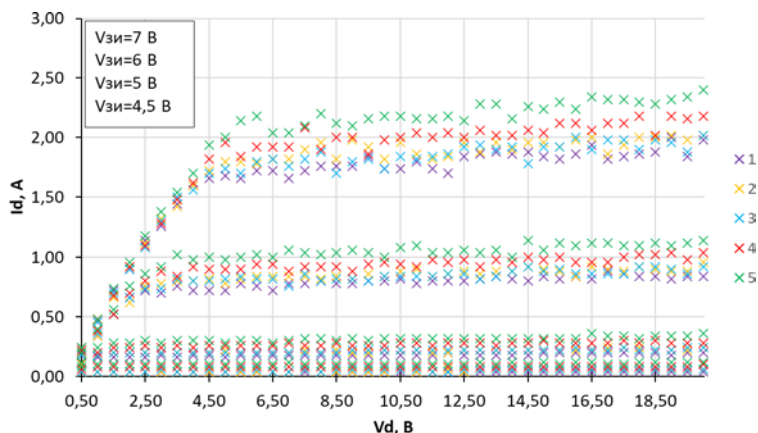


Рис. 1. Разброс выходных характеристик тестовых МОП-транзисторов IRF610 при температуре 80°C

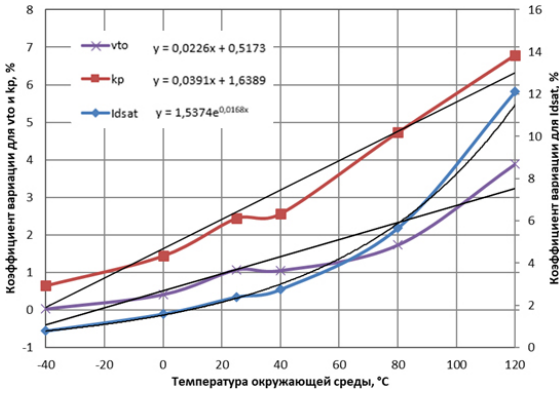


Рис. 2. Зависимость разброса параметров от температуры; сплошные линии — аппроксимация

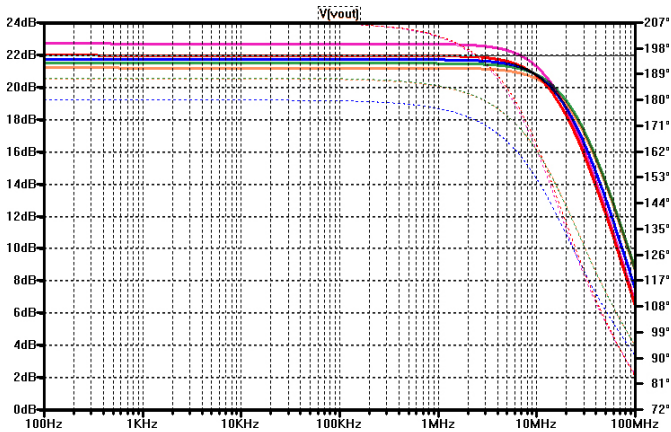


Рис. 3. Разброс АЧХ (по левой оси) и ФЧХ (по правой оси) усилителя мощности при температуре 80 °С

Заключение

Неидеальность технологического процесса с ростом температуры начинает оказывать большее влияние на разброс параметров транзистора, что приводит к разбросу его электрических характеристик, и как следствие к разбросу схемных характеристик. Для учета разброса при моделировании была модифицирована стандартная температурозависимая модель MODPEX для мощных МОПТ. Были промоделированы характеристики нескольких типовых примеров схемных фрагментов на основе мощных МОПТ. На основе анализа этих результатов продемонстрирована связь между разбросом параметров МОПТ и разбросом параметров схемных фрагментов.

Литература

1. Денисенко В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии, 2004. — № 36. — С. 28–34.
2. Елисева Д. А., Сафонов С. О. Анализ механизмов деградации подзатворных диэлектриков на основе SiO₂ в МОП-ТРАНЗИСТОРАХ // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2020. — Т. 25. — № 6. — С. 517–524.
3. Применко П. С. Практический опыт измерения электрических характеристик мощных МОП-транзисторов // Материалы Международной научно-технической конференции. (Москва, 1–5 дек. 2015 г.). — Москва, 2015. — С. 234–237.
4. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Исмаил-Заде М. Р., Кожухов М. В., Харитонов И. А., Попов Д. А., Силкин Д. С. Программно-аппаратный комплекс для определения параметров SPICE-моделей электронных компонентов для гражданских и специальных применений // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 179–188.
5. Symmetry, Документация MODPEX Modeling Tool, URL: <http://www.symmetry.com> (дата обращения 23.02.2023).

УДК 537.8

Применение ферромагнитных материалов для обеспечения работоспособности RFID-меток при контакте с металлическими объектами

Эпов И. В.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ierov@niime.ru

² Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрены и изучены возможности применения ферромагнитных материалов для обеспечения возможности считывания RFID-меток, располагающихся на экранирующих металлических поверхностях.

Ключевые слова: RFID; СВЧ; металлический объект; ферромагнетик; дальность считывания; КУ антенны.

Введение

Физические свойства поверхности объекта, на котором располагается радиометка, напрямую влияют на выходные характеристики метки — дальность считывания и рабочую частоту [1–2]. Например, линейные (плоские) антенны, обладающие высоким коэффициентом усиления (КУ) антенны, не работают при контакте с металлом [3].

В радиометках ВЧ (13,56 МГц) и СВЧ-диапазона (867 МГц), для решения данной проблемы широко используется подложка из ферромагнетика — феррита, располагающегося под плоской антенной метки [4]. В докладе показана физическая модель принципа работы метки в СВЧ-диапазоне с линейной антенной, расположенной на металле непосредственно и с промежуточной ферромагнитной прокладкой.

Влияние ферромагнетика на параметры радиочастотной метки СВЧ-диапазона, расположенной на металлической поверхности

Из теории антенн известно, что КПД антенны определяется такими параметрами, как $R_{\text{изл}}$ — сопротивление излучения и $R_{\text{пот}}$ — сопротивление активных потерь. $R_{\text{изл}}$ напрямую определяет эффективность антенны и, соответственно, дальность считывания метки [5]. В докладе показано, что при контакте линейной антенны с металлом сопротивление излучения стремится к нулю, и процесс считывания метки становится невозможным.

Внесение ферромагнитной подложки из феррита приводит к физическим эффектам, при которых $R_{\text{изл}}$ принимает ненулевое значение.

Заключение

Изучено влияние ферромагнитных материалов на возможность считывания RFID-меток, которые расположены на металлических поверхностях.

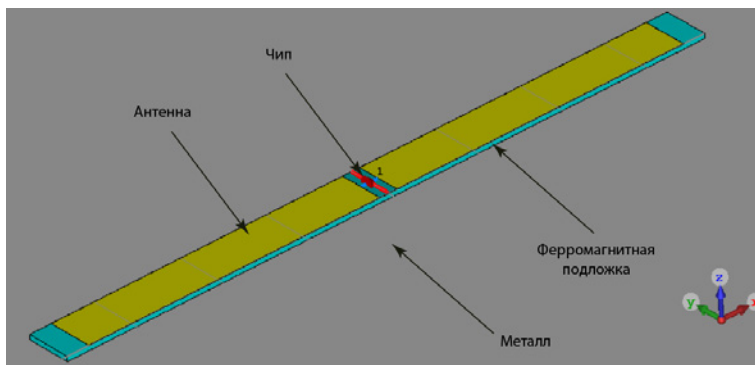


Рис. 1. Изображение линейной метки, расположенной на ферромагнитной подложке и металле

Литература

1. Zhu J., Li Z. Analysis of magnetic shielding effect on an RFID coil antenna in metallic environments with a ferrite toroid // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020. Vol. 62. № 6. P. 2613–2620.
2. Красников Г.Я., Панасенко П.В., Волосов А.В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
3. Gao B., Yuen M. M. F. Passive UHF RFID with ferrite electromagnetic band gap (EBG) material for metal objects tracking // 2008 58th Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2008. P. 1990–1994.
4. Stergiou C., Eleftheriou E., Zaspalis V. Enhancement of the near-field UHF RFID with ferrite substrates // IEEE transactions on magnetics, 2012. Vol. 48. № 4. P. 1497–1500.
5. Зырянов Ю.Т. и др. // Антенны, 2014.

УДК 621.315.592

Явление сегрегации примесных атомов в эпитаксиальных структурах кремния

Дубкова А. С.^{1,2}

¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141195, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
Dubkova.a.s@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Рассмотрено проявление эффекта поверхностной сегрегации атомов примеси в эпитаксиальных структурах кремния. Показано, что аномальные свойства приповерхностного слоя распространяются на глубину до 20 нм, при этом коэффициент распределения для легирующих примесей между объемом и поверхностью может иметь большие значения до $N_{\text{пов}}/N_{\text{об}} = 10^2$.

Ключевые слова: поверхностная сегрегация; кремний; газофазная эпитаксия.

Введение

Поверхностная сегрегация — явление изменения состава, структуры и свойств поверхностных слоев атомов вещества в конденсированном, то есть в твердом или жидком состояниях. Причина поверхностной сегрегации — резкое изменение атомной структуры (уменьшение числа соседних атомов) на поверхности по сравнению с объемом. Большая часть примесей преимущественно накапливается в этой искаженной области кристалла. Поэтому на начальной стадии эпитаксиального роста легирующая примесь расходуется на обогащение тонкого, около 10 нм, слоя.

Основная часть

При температурах роста слоя ниже 1000 °С значительное влияние на профиль распределения примеси по толщине эпитаксиального слоя оказывает эффект поверхностной сегрегации примеси. Если наращивать легированный слой, то из-за сегрегации на начальной стадии эпитаксиального роста легирующая примесь расходуется на обогащение приповерхностного тонкого слоя. В результате чего, если не принимать мер, то на начальном участке растущего слоя появится недолегирующая область. В некоторых работах [8–11] можно встретить профили распределения примеси, полученные методом вторичной ионной масс спектроскопии (ВИМС). Так как, процессы молекулярно-лучевой эпитаксии проводят при низких температурах (меньше 800 °С), то на профилях легирования можно заметить сегрегацию примеси.

В данной работе эффект поверхностной сегрегации примеси исследовали путем измерения изменения поверхностного сопротивления при последовательных окислении-удалении поверхностного слоя эпитаксиальной структуры и расчета концентрации примеси в удаленных слоях.

Образцы получали методом эпитаксии кремния из газовой фазы при пониженном давлении и температуре. Эпитаксиальный слой, легированный фосфором и бором, формировали на кремниевой подложке. Профили легирования полученных структур приведены на рис. 1.

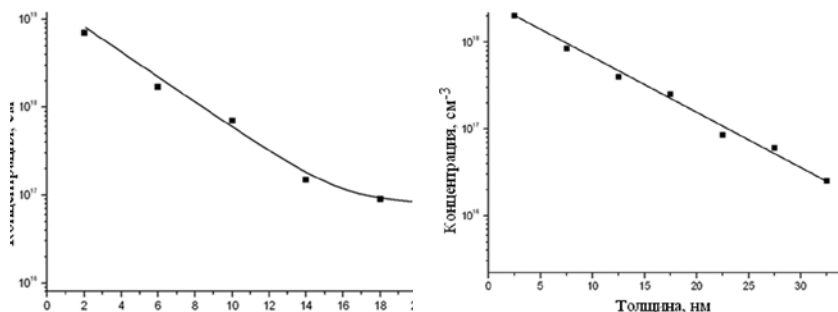


Рис. 1. Профиль распределения фосфора и бора по толщине эпитаксиального слоя

На рис. 1 и 2 хорошо видно возрастание концентрации примеси до 2х порядков к поверхности. Это объясняется поверхностной сегрегацией легирующих примесей, которая оказывает сильное влияние в первую очередь на формирование переходных концентрационных границ между отдельными слоями многослойных эпитаксиальных структур.

Аномальные свойства приповерхностного слоя распространяются на глубину до 20 нм, при этом коэффициент распределения для легирующих примесей между объемом и поверхностью может иметь большие значения до $N_{\text{пов}}/N_{\text{об}} = 10^2$.

Заключение

Явление поверхностной сегрегации проявляется при легировании слоев как *n*, так и *p*-типа проводимости. Полученные экспериментальные данные доказывают, что при проведении эпитаксиального процесса из газовой фазы при пониженной температуре необходимо учитывать явление сегрегации легирующих примесей в приповерхностной области роста и использовать способы, уменьшающие ее влияние на формирование профиля легирования структур.

Литература

1. Величко О. И. Явление сегрегации примесных атомов в области залегания *p-n*-перехода // Доклады БГУИР, 2016. — № 6 (100). — С. 30–34.
2. Шенгуров В. Г., Чалков В. Ю., Шенгуров Д. В., Денисов С. А. Выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремниевых слоев *n*-типа проводимости на сильнолегированных бором подложках // Физика и техника полупроводников, 2009. — Т. 43. — № 2. — С. 193–196.
3. Keith H. Chung. Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy // Princeton, 2010. 149 p.
4. Дубкова А. С., Рябов В. Н., Тарасов И. В., Хахин Н. Б. Эпитаксиальные структуры кремния для СВЧ приборов // Электронная техника. Серия I. СВЧ-техника, 2022. — № 2 (553). — С. 58–63.

УДК 532.614

Влияние поверхностной энергии на анизотропию работы выхода на разных гранях кристаллов I и II групп химической таблицы Д. И. Менделеева

Быковский К. С.^{1,2}

¹ АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

kbykovskiy@niime.ru

² Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассмотрена модель координационного плавления кристалла (МКП), по которой на начальной стадии в расплавленное состояние переходит слой, имеющий толщину, равную толщине первой координационной сферы атомов в кристаллографическом направлении, перпендикулярном данному поверхностному слою. Рассчитанные по МКП значения удельной поверхностной энергии сопоставлены с расчетами по другим моделям. Показано, что анизотропия поверхностной энергии по МКП совпадает с экспериментальными значениями анизотропии работы выхода электрона на разных поверхностях монокристаллов и с теоретическими расчетами по моделям, не использующим при расчетах диаграммы Г. Вульфа, и превосходит по точности расчеты по наиболее известной базе данных Crystalium.

Ключевые слова: модель координационного плавления (МКП); поверхностная энергия; работа выхода электрона.

Введение

Анизотропия поверхностной энергии относится к одним из самых малоизученных физико-химических свойств поверхности кристаллических материалов. В экспериментальном определении этого свойства очень много трудностей. Из этого следует, что наиболее распространены теоретические методы расчета поверхностных свойств кристаллов. Для реализации расчетов рассмотрим модель координационного плавления (МКП).

Модель координационного плавления и сопоставление с другими моделями

Данная модель связывает кристаллическую структуру с его анизотропией поверхностных свойств и позволила рассчитать значения поверхностной энергии большинства элементов химической таблицы Д. И. Менделеева по формуле:

$$\sigma_{hkl} = (L_{hkl} \cdot \rho / M) \int_0^{T_p} C_p dT,$$

где L_{hkl} — толщина слоя первого координационного окружения, ρ — плотность вещества, M — его молекулярный вес, C_p — его теплоемкость при 298 К, T — температура плавления кристалла [1]. В соответствии с МКП для кристаллических веществ с ОЦК-структурой величина поверхностной энергии убывает в ряду $\sigma_{(110)} > \sigma_{(100)} > \sigma_{(111)}$, а для кристаллов с ГЦК-структурой — в ряду $\sigma_{(111)} > \sigma_{(100)} > \sigma_{(110)}$. Опираясь на данные выводы, проведено сопоставление с другими моделями [2, 3].

При сравнении, у других моделей [4, 5] и [6] не прослеживается анизотропия и в ОЦК-структурах преобладает поверхностная энергия (111), а в [5] эта же поверхность имеет наименьшее значение.

Рассмотрим значения работы выхода электрона. В ОЦК-структуре прослеживается анизотропия в справочнике экспериментальных значений [8] и в работе [7], когда в ГЦК анизотропия у базы данных Crystalium [6] прослеживается в работе выхода электрона, но в значениях поверхностной энергии она отсутствует.

	(hkl)	σ_{hkl} (МКП), мДж/м ²	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [4]	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [5]	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [6]	Работа выхода электро- на, эВ [8]	Работа выхода электро- на, эВ [7]	Работа выхода электро- на, эВ [6]
Li	100	305	522	269,7	460	2,40	2,28	2,957
	110	431	556	253,1	500	2,40	3,03	3,185
	111	176	590	181,1	540	2,30	2,04	2,599
Na	100	188	264	133,1	220	2,75	2,28	2,532
	110	267	253	124,7	220	3,10	2,84	2,709
	111	109	287	89,3	250	2,65	2,11	2,503
K	100	122	142	85,5	120	2,40	2,25	2,153
	110	173	135	78,1	110	2,75	2,64	2,367
	111	70	152	55,9	130	2,35	2,13	2,130
Rb	100	100	112	68,1	90	2,35	2,16	2,101
	110	141	104	72,6	80	2,65	2,51	2,231
	111	57	118	48,7	100	2,30	2,05	2,050
Cs	100	87	93	59,4	70	2,30	1,87	1,971
	110	123	82	55,5	60	2,60	2,20	2,041
	111	50	92	39,8	80	2,20	1,77	1,588
Be	0001	1820			1800			5,321
	2 $\bar{1}$ 32	726			2310			4,593
	10 $\bar{1}$ 2	1397			2270			4,715
	2 $\bar{1}$ 12	1013			2500			4,786
Mg	0001	904	792		510	4,05		3,614
	2 $\bar{1}$ 32	169			740			3,557
	10 $\bar{1}$ 2	329			700			3,580
	2 $\bar{1}$ 12	237			740			3,621
Ca	100	619	542		460	2,55		2,560
	110	438	582		540			2,738
	111	715	567		460			2,944



	(hkl)	σ_{hkl} (МКП), мДж/м ²	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [4]	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [5]	σ_{hkl}^* , мДж/м ² [6]	Работа выхода электро- на, эВ [8]	Работа выхода электро- на, эВ [7]	Работа выхода электро- на, эВ [6]
Sr	100	509	408		340	2,43		2,473
	110	360	432		410			2,489
	111	588	428		350			2,540
Ba	100	362	353		320	2,48		2,282
	110	513	376		310			2,350
	111	209	397		390			2,236

Заключение

Сравнение поверхностных энергий и работ выхода электрона по разным моделям и по базе данных Crystalium показало, что в расчетах по МКП выявлена прямая связь анизотропии с кристаллической структурой веществ что не свойственно ряду моделей из-за применяемых при расчетах анизотропии поверхностных энергий выводов Г. Вульфа о минимальных значениях σ_{hkl} на гранях с max ретикулярной плотностью. Также немаловажным отличием является отсутствие в формуле подгоночных коэффициентов для описания различных веществ. С помощью МКП были рассчитаны поверхностные энергии всех элементарных веществ периодической системы Менделеева, в том числе монокристаллов, применяемых в микроэлектронике и в химической промышленности.

Литература

1. Bokarev V. P., Krasnikov G. Y. Model of coordination melting of crystals and anisotropy of physical and chemical properties of the surface // Surface Science, 2018. Vol. 668. P. 73–79.
2. Бокарев В. П., Красников Г. Я., Горнев Е. С. Анизотропия поверхностных свойств кристаллов и ее роль в технологии микроэлектроники // Наноиндустрия, 2019. — № 5 (89). — С. 175–179.
3. Бокарев В. П. Развитие физико-химических принципов оценки влияния поверхностной энергии на свойства материалов и процессы для технологии микроэлектроники // Диссертация д. т. н. — М.: МИЭТ, 2020. — 292 с.
4. Vitos L., Ruban A. V., Skriver H. L., Kollar J. The surface energy of metals // Surface Science, 1998. Vol. 411. P. 186–202.
5. Erhieyovwe A., Edison E. A., Iyayi S. Comparison of Surface Energy of Bcc Alkali Metals and Transition Metals Using Maeam // Rev. Adv. Phys. Theor. Appl., 2014. Vol. 1. № 1. P. 34–41.
6. Электронный ресурс: <http://crystalium.materialsvirtuallab.org>
7. Владимиров А. Ф. Термодинамический, кристаллографический и дефектно-деформационный аспекты изменения работы выхода электрона. Диссертация к. ф.-м. н. — Рязань: РГСА, 2001. — 211 с.
8. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Издание четвертое. — Киев: «Наукова думка», 1981. — 340 с.

УДК 537.621.5

Сверхбыстрая динамика намагниченности спинтронного излучателя на основе структуры Co/IgMn

Авдеев П. Ю., Лебедева Е. Д., Горбатова А. В., Буряков А. М.

МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

pasha.avdeev.2000@mail.ru

В работе экспериментально исследована фотоиндуцированная динамика намагниченности структуры Co/IgMn. Продемонстрирована взаимосвязь намагниченности и ТГц-излучения, генерируемого структурой. Определена немагнитная составляющая фотоиндуцированной динамики системы.

Ключевые слова: фотоиндуцированная динамика намагниченности; ТГц-излучение; обменное взаимодействие; структура ферромагнетик/антиферромагнетик

Создание и характеристика различных спинтронных излучателей терагерцевого (ТГц) излучения на основе металлических слоев нанометровой толщины является одним из наиболее актуальных и перспективных направлений исследований в ТГц спинтронике [1, 2]. Огромный интерес исследователей, начиная с пионерских работ в этом направлении [3, 4, 5], представляют физические аспекты ТГц генерации на микроуровне. В частности, поведение магнитной подсистемы спинтронных эмиттеров до сих пор не было подробно изучено. На устранение этой проблемы была направлена данная исследовательская работа.

В нашей работе была экспериментально исследована фотоиндуцированная динамика в структуре Co/IgMn. Слои ферромагнитного Co и антиферромагнитного IgMn толщиной 3 и 5 нм были нанесены на сапфировую и кремниевую подложки методом магнетронного распыления.

Слой антиферромагнетика формирует одноосную магнитную анизотропию в системе в плоскости пленки, что подтверждается петлями гистерезиса, полученными при помощи продольного магнитооптического эффекта Керра.

Наше исследование проводилось двумя методиками: методом накачки-зондирования в геометрии на отражение (pump-probe) и терагерцевой спектроскопии временного разрешения в геометрии на пропускание (THz-TDS). Описание методики THz-TDS подробно описано в работе [6].

В ходе эксперимента были получены временные зависимости фотоиндуцированного отклика исследуемой структуры от различных величин прикладываемого к образцу магнитного поля. Из полученных зависимостей были получены данные о спиновой прецессии и фотоиндуцированных фоновых модах в структуре Co/IgMn. Также были получены зависимости фотоиндуцированного отклика структуры Co/IgMn от мощности возбуждающих лазерных импульсов, что позволило разграничить тепловые и магнитные эффекты, протекающие в данной структуре.

Методом THz-TDS, проводящимся одновременно с методом накачки-зондирования, получены временные профили и частотные характеристики ТГц сигналов, возбуждаемых фемтосекундными лазерными импульсами. Синхронная по времени регистрация ТГц сигналов и фотоиндуцированного отклика позволила

выявить корреляции между поведением намагниченности и ТГц импульсами, что предоставляет информацию о механизме ТГц генерации в данной структуре.

***Исследование было выполнено при поддержке Российского научного фонда
(грант РНФ №21-79-10353)***

Литература

1. Buryakov A. et al. Controlled Spintronic Emitter of THz Radiation on an Atomically Thin WS₂/Silicon Substrate // *Metals (Basel)*, 2022. Vol. 12. № 10.
2. Buryakov A. et al. The Role of Ferromagnetic Layer Thickness and Substrate Material in Spintronic Emitters // *Nanomaterials*, 2023. Vol. 13. № 11. P. 1710.
3. Kampfrath T. et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures // *Nat. Nanotechnol*, 2013. Vol. 8. № 4. P. 256–260.
4. Seifert T. et al. Terahertz Spin Currents and Inverse Spin Hall Effect in Thin-Film Heterostructures Containing Complex Magnetic Compounds // *SPIN*, 2017. Vol. 07. № 03. P. 1740010.
5. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // *J. Appl. Phys.*, 2021. Vol. 130. № 9.
6. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // *Sci. Rep.*, 2021. Vol. 11. № 1. P. 697.

УДК 538.91

Исследование влияния пористости на свойства пленок ЦТС и их применимость в устройствах микроэлектроники

Жемеров Е. И., Буряков А. М., Воротилов К. А., Серегин Д. С., Мишина Е. Д.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

С помощью атомно-силовой микроскопии были проведены исследования для изучения зависимости изменения топографии серии плотных пленок ЦТС от концентрации добавочного порогена. С использованием метода СМП были охарактеризованы локальные изменения электрофизических параметров структуры.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия; цирконат-титаната свинца; силовая микроскопия пьезоотклика; пористые сегнетоэлектрики.

В современном мире, где требования к эффективности и миниатюризации технологий становятся все более строгими, создание сегнетоэлектрических пленок играет ключевую роль в развитии передовых устройств, позволяя реализовать ультратонкие переключаемые и высокочувствительные сенсоры, которые найдут применение в областях от электроники до медицины. Современные методы создания сегнетоэлектрических структур позволяют получить в основном тонкие пленки, (несколько сотен нанометров). Однако такие толщины являются актуальной проблемой, поскольку их интеграция в качестве активного материала в МЭМС устройства предполагает толщину порядка сотен микрон. Для решения данной задачи было предложено вводить органический полимер (или пороген), в работах [1–5] было показано, что его введение позволяет увеличить толщину пленок за счет увеличения вязкости пленкообразующего раствора. При отжиге пороген подвергается деструкции, образуя пористую структуру. В качестве вводимого порогена применялись полиэтиленимин [1], поливинилацетамид [2], полиэтиленгликоль [3], и поливинилпирролидон (PVP) [4, 5]. Поры в этих материалах могут быть открытыми или закрытыми. Влияя на концентрацию, размеры этих пор можно управлять параметрами создаваемой структуры. С появлением пористых пленок PZT появилась необходимость характеризовать эти пленки, установить, каким образом пористость структуры сказывается на электрофизических свойствах пленок, а также изучить, каким образом параметры пор в выращенных пленках зависят от параметров вводимого в пленкообразующий раствор порогена, для возможности прогнозирования качества пленок до их изготовления.

продукта.

Оценен количественный вклад увеличения концентрации полимера в топографию. Показано, что добавление 1 % поливинилпирролидона запускает процесс самоорганизации поверхностного слоя структуры. Результатом этого процесса является образование на поверхности крупнозернистой структуры со средней шириной одного «острова» около 1,7 мкм. Дальнейшее увеличение концентрации полимера приводит к уменьшению площади занимаемой пористой фазой. В свою очередь это позволяет активной фазе занять освободившееся пространство, что и приводит к уменьшению размера зерен, но увеличивает их общее количество.

Характер этих изменений сохранился для всех последующих образцов, где средняя ширина зерна уменьшалась вплоть до 100 нм.

Получены профили доменной структуры исследуемых материалов, проведена переполяризация оригинальной доменной структуры путем зарядовой литографии. Рассчитаны эффективные коэффициенты относительной пьезодеформации. Определена податливость каждой из исследуемых структур на манипуляции с помощью внешнего электрического поля. Определен образец с оптимальным соотношением толщины и пористости. Показано, что не смотря на высокую пористость, сегнетоэлектрическая пленка переполяризуется.

Работа выполнена при поддержке гранта FSFZ-2023-0005

Литература

1. Jia Q.X., McCleskey T. M., Burrell A. K., Lin Y., Collis G. E., Wang H., Li A. D.Q., Foltyn S. R. Polymer-assisted deposition of metal-oxide films // *Nature mater.*, 2004. Vol. 3. № 8. P. 529–532.
2. Kozuka H., Takenaka S., Tokita H., Okubayashi M. PVP-assisted sol-gel deposition of single layer ferroelectric thin films over submicron or micron in thickness // *J. Eur Ceramic Soc.*, 2004. Vol. 24. P. 1585–1588.
3. Yamano A., Takata K., Kozuka H. J. Ferroelectric domain structures of 0.4-mm-thick $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ films prepared by polyvinylpyrrolidone-assisted sol-gel method // *Appl. Phys.*, 2012. Vol. 111. 054109-1-5.
4. Stancu V., Lisca M., Boerasu I. et al. Effects of porosity on ferroelectric properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ films // *Thin Solid Films*, 2007. Vol. 515. P. 6557–6561.
5. Oh S. M., Kang M.-G., Do Y. H. et al. Fabrication of 1 μm thickness lead zirconium titanate films using poly(N-vinylpyrrolidone) added sol-gel method // *Transactions on electrical and electronic materials*, 2011. Vol. 12. № 5. P. 222–225.

УДК 537.874.32; 537.871.52

Методы плавной перестройки амплитуды и поляризации ТГц сигнала в структурах, содержащих слои нематика и графена

Дубинецкий Н. Н., Поддубская О. Г., Волюнец Н. И., к. ф.-м. н., Батраков К. Г.
НИУ «Институт ядерных проблем БГУ»
220030, Беларусь, г. Минск, ул. Бобруйская, 11
mikola4dnn@gmail.com

Исследованы и предложены методы создания структур на основе слоев нематических жидких кристаллов (НЖК) и тонких углеродных пленок, позволяющих изменять поляризацию и амплитуду терагерцового излучения. Продемонстрирована возможность усиления эффектов двулучепреломления в таких структурах. Полученные результаты открывают дополнительные перспективы для создания устройств управления терагерцовым излучением.

Ключевые слова: графен; жидкие кристаллы; нематик; терагерцовое излучение.

Уникальные свойства электромагнитного излучения ТГц-диапазона (0,1–10 ТГц), как проникающая способность для большинства диэлектрических материалов, неонизационный характер взаимодействия, чувствительность к низкоэнергетическим колебаниям многоатомных молекул и т.д., открывают широкие возможности при проектировании нового поколения систем неразрушающего контроля, в медицине и материаловедении. Для развития телекоммуникационной отрасли освоение ТГц-диапазона также представляет собой новый рубеж [1], соответствующий пятому и шестому поколению (5G–6G) высокоскоростной беспроводной связи со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с [2]. Большинство диэлектрических материалов слабо поглощает излучение этого диапазона, что позволяет проводить неразрушающее сканирование интегральных схем и микропроцессоров [3] для поиска различного рода дефектов — это делает перспективным использование терагерцового излучения в микроэлектронике. При этом, эффективность решения многих практических задач тесно связана с дальнейшим развитием компактных ТГц генераторов/детекторов, пассивных и активных элементов ТГц фотоники, при проектировании которых, наряду с традиционными полупроводниковыми материалами (Si, GaAs и т.д.), в последние десятилетия активно применяются структуры на основе углерода.

Сверхтонкие углеродные пленки графена и пиролитического углерода, несмотря на толщину, много меньшую толщины скин-слоя, обладают высоким поглощением в ТГц-диапазоне. Однако, изменяя оптические характеристики подложки, можно изменять и поглощение пленок [4]. Таким образом, с использованием графена и пиролитического углерода можно создавать детекторы ТГц-излучения, а также регулировать интенсивность излучения.

В качестве материала с изменяемыми оптическими характеристиками могут выступать нематические жидкие кристаллы (НЖК). Использование НЖК также дает возможность преобразовывать поляризацию падающего на кристалл излучения. Показатели преломления нематиков можно изменять путем приложения внешнего электрического поля. Для этого сверхтонкие углеродные пленки можно использовать в роли электродов [5], поскольку монослой графена или тонкий слой

пиролитического углерода могут поглощать и отражать значительно меньше излучения, чем широко используемые электроды ИТО (оксид индия-олова), вследствие большей толщины последних.

В представленной работе продемонстрированы различные методы перестройки структур, содержащих слои нематика и графена. За основу была взята НЖК ячейка с электродами из сверхтонких углеродных пленок. Управлять характеристиками проходящего через структуру сигнала можно:

- изменяя направление оптической оси путем приложения напряжения к электродам или поворота ячейки;
- изменяя расстояние между двумя последовательно расположенными ячейками. Используя такую систему, можно добиться значительного увеличения разности фаз выходящих обыкновенной и необыкновенной волн по сравнению с одной ячейкой и достичь круговой поляризации;
- изменяя угол наклона ячейки. Таким способом можно добиться более чем двукратного увеличения разности фаз при потере коэффициента прохождения всего в 10% по сравнению с нормальным падением. Однако при этом амплитуды необыкновенной и обыкновенной волн заметно отличаются, что не позволяет добиться круговой поляризации в отличие от предыдущего метода.

Литература

1. Leitenstorfer A. et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap // Journal of Physics D: Applied Physics, 2023. Vol. 56. № 22. P. 223001.
2. Семенова В., Беспалов В. Терагерцевые технологии для телекоммуникаций // Первая миля, 2015. — Т. 58. — № 7. — С. 36.
3. Park S. H., Jang J. W., Kim H. S. Non-destructive evaluation of the hidden voids in integrated circuit packages using terahertz time-domain spectroscopy // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015. Vol. 25. № 9. P. 095007.
4. Paddubskaya A. et al. Tunable perfect THz absorber based on a stretchable ultrathin carbon-polymer bilayer // Materials, 2019. Vol. 12. № 1. P. 143.
5. Margaryan H. L. et al. Pyrolytic carbon/liquid crystal structure based platform for tunable THz components // International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022). IET, 2022. Vol. 2022. P. 66–69.

УДК 537.8.029, 539.231

Физические эффекты в спинтронных ТГц генераторах на основе Co/W в зависимости от толщины ферромагнитного слоя

Лаптева М. С.¹, Авдеев П. Ю.¹, Лебедева Е. Д.¹, Буряков А. М.¹, Климов А. А.^{1,2}, Мишина Е. Д.¹

¹ МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

lapteva@mirea.ru

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

Отработана технология создания тонких пленок металлов при помощи системы магнетронного распыления. Разработан технологический маршрут создания спинтронных ТГц генераторов на основе двухслойных гетероструктур состоящих из тонких слоев ферромагнитных и немагнитных металлов. Исследовано влияние толщины слоя ферромагнитного металла на генерацию ТГц-излучения.

Ключевые слова: тонкие пленки; терагерцевое излучение; спинтронные ТГц генераторы; обратный спиновый эффект Холла.

Введение

В последнем десятилетии ряд ученых направили свои научные исследования на разработку и создание инновационных источников терагерцевого излучения [1–2]. Терагерцевая спинтроника представляет собой передовое направление в области спиновой электроники, обеспечивающее генерацию ТГц-излучения в двухслойных гетероструктурах, состоящих из ферромагнитных (ФМ) и немагнитных (НМ) металлических магнитных пленок. Данный процесс генерации, характеризующийся как спинтронный ТГц генератор, принципиально опирается на спиновые взаимодействия, проявляющиеся в магнитных слоях. Ключевыми физическими механизмами, обуславливающими генерацию ТГц-излучения в металлических слоях, выступают следующие спиновые эффекты: обратный спиновый эффект Холла, обратный эффект Рашбы — Эдельштейна и сверхбыстрое размагничивание [3–4].

Исследование генерации ТГц-излучения в двухслойных гетероструктурах

В работе методом магнетронного распыления (VacCoat DST-3A), создана серия спинтронных генераторов на основе тонких слоев ферромагнитного кобальта (Co) и немагнитного вольфрама (W). Серия образцов состояла из двух групп. В первой группе, на подложку сначала был осажден слой W, следующим слоем был осажден Co (Co/W), во второй серии последовательность слоев была противоположной (W/Co). Толщина слоя Co варьировалась в диапазоне 3, 5 и 10 нм, при этом толщина W была постоянной и составляла 3 нм. Слои металлов были осаждены в постоянном магнитном поле на подложки SiO₂ в целях формирования в магнитной пленке ярко выраженной магнитной анизотропии. Процесс осаждения тонких пленок в камере магнетронной распылительной системы проходил в среде рабочего газа (Ar) при давлении $9 \cdot 10^{-3}$ торр, RF методом. Перед началом осаждения вакуумная

камера откачивалась до 10^{-5} торр. Толщина слоев контролировалась с помощью кварцевых датчиков и эллипсометрии. Для подтверждения наличия магнитных свойств серия образцов была исследована на установке магнитооптического эффекта Керра. Далее созданная серия исследовалась методом терагерцевой спектроскопии временного разрешения на пропускание (THz-TDS).

Результаты магнитооптического эффекта Керра подтвердили наличие магнитной анизотропии для всей серии. Анализ магнитооптических свойств полученных образцов выявил, что интерфейсный вклад W в изменение коэрцитивной силы H_c заметен при минимальной толщине Co в 3 нм. Для более толстых слоев 5 и 7 нм значения H_c совпадают, что ведет к «схлопыванию» петли гистерезиса.

В результате исследования THz-TDS были получены ТГц-сигналы со всей серии ТГц генераторов. Наибольшая амплитуда генерации ТГц-излучения наблюдалась на гетероструктуре W (3 нм)/ Co (3 нм). В двухслойных гетероструктурах, где W являлся нижним слоем, с достижением минимальной толщины в 3 нм, величина ТГц амплитуды меньше почти в 10 раз.

Заключение

Отработана технология создания спинтронных ТГц генераторов на установке магнетронного распыления VacCoat DST-3A. Подтвержден механизм генерации ТГц-излучения, основанный на обратном спиновом эффекте Холла. Показано, что с уменьшением толщины ферромагнитного металла, наибольшая эффективность генерации ТГц-излучения наблюдается в спинтронном эмиттере с толщиной Co 3 нм.

*Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда,
№ 21-79-10353 (<https://rscf.ru/project/21-79-10353>)*

Литература

1. Papaioannou E. T., Beigang R. THz spintronic emitters: a review on achievements and future challenges // Nanophotonics, 2021. Vol. 10. № 4. P. 1243–1257.
2. Seifert T. et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics, 2016. Vol. 10. № 7. P. 483–488.
3. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // Journal of Applied Physics, 2021. Vol. 130. № 9. P. 091101.
4. Bull Charlotte, Hewett Simmone M., Ji Ruidong, Lin Cheng-Han, Thomson Thomas, Graham Darren M., Nutter Paul W. Spintronic terahertz emitters: Status and prospects from a materials perspective. APL Mater 1 September 2021, 9 (9): 090701. <https://doi.org/10.1063/5.0057511>.

УДК 537.862

Механизмы генерации ТГц-излучения в спинтронных генераторах на основе IgMn и Co

Лебедева Е. Д., Авдеев П. Ю., Горбатова А. В., Буряков А. М.

МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

caterina-lebedeva2015@yandex.ru

В работе были экспериментально исследованы свойства ТГц-излучения, генерируемого спинтронными эмиттерами на основе структуры Co/IgMn . На основе полученных зависимостей и литературных данных было выдвинуто предположение о механизмах ТГц генерации в данной структуре и их связи друг с другом.

Ключевые слова: терагерцевая спектроскопия во временной области; спинтронные эмиттеры; ТГц; механизм ТГц генерации; обратный спиновый эффект Холла; сверхбыстрое размагничивание.

Терагерцевое (ТГц) излучение находится в диапазоне частот от 100 ГГц до 30 ТГц и активно применяется в медицине, фармацевтике, биотехнологиях, нанoeлектронике и других областях [1, 2]. В 2013 году была продемонстрирована ТГц генерация ультратонкими металлическими бислойнными структурами [3] (т. н. спинтронными эмиттерами).

В отличие от других источников ТГц-излучения спинтронные генераторы обладают широким спектральным диапазоном и большой напряженностью генерируемого излучения, а также возможностью управления ТГц поляризацией [4, 5].

Как правило, в таких генераторах используются следующие материалы: ферромагнитные (ФМ) и немагнитные (НМ) металлы, полупроводники (в т. ч. двумерные полупроводники), магнитные оксиды и интерметаллические сплавы [6]. На данный момент считается, что генерация ТГц-излучения в спинтронных эмиттерах связана со спиновыми эффектами. Эти эффекты возникают при воздействии лазерных импульсов фемтосекундной длительности. В структурах типа ФМ/НМ основным механизмом генерации ТГц-излучения считается обратный спиновый эффект Холла. При наличии в спинтронном эмиттере тонкого слоя материала с инверсионной симметрией наблюдается обратный эффект Рашбы — Эдельштейна — пространственное перераспределение электронов с разными спинами. Кроме того, возбуждающие лазерные импульсы способны вызвать неравновесные процессы в фоновой, электронной и спиновой подрешетках, что приводит к сверхбыстрому размагничиванию магнитного слоя и, как следствие, генерации ТГц-излучения. Таким образом, большой интерес в качестве источников ТГц-излучения могут представлять вещества с несколькими магнитными подрешетками, в числе которых антиферромагнетики (АФМ) и различные ферриты.

В нашей работе экспериментально изучен механизм ТГц-генерации в структуре ФМ/АФМ. В качестве ФМ использовалась пленка Co толщиной 3 нм, а в качестве АФМ слоя — IgmN толщиной 5 нм. Обе пленки были получены методом магнетронного распыления на сапфировую подложку. Поверхность структуры была покрыта защитным слоем SiO_2 толщиной 3 нм.

Исследование проводилось методом терагерцевой спектроскопии временно-го разрешения в геометрии на пропускание. Подробное описание этой методики представлено в статье [5]. Получены зависимости пиковой ТГц-амплитуды от величины прикладываемого к структуре внешнего магнитного поля — ТГц гистерезис. Полученные петли гистерезиса продемонстрировали наличие у спинтронного эмиттера одноосной магнитной анизотропии, лежащей в плоскости структуры. Взаимодействие ФМ и АФМ магнитных подрешеток выражалось в обменном сдвиге петли гистерезиса, полученной при помощи продольного магнитооптического эффекта Керра.

Для определения наличия спиновых токов и их вклада в генерацию ТГц-излучения были получены временные ТГц-профили при накачке образца как со стороны магнитной металлической структуры, так и со стороны подложки.

*Исследование было выполнено при поддержке Российского научного фонда
(грант РФФ № 21-79-10353)*

Литература

1. Гареев Г., Лучинин В. Применение терагерцевого излучения в биологии и медицине // Наноиндустрия, 2014. — № 6. — С. 34–45.
2. Wan M., Healy J.J., Sheridan J. T. Terahertz phase imaging and biomedical applications // Opt. Laser Technol., 2020. Vol. 122. P. 105859.
3. Kampfrath T. et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures // Nat. Nanotechnol., 2013. Vol. 8. № 4. P. 256–260.
4. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 9.
5. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep., 2021. Vol. 11. № 1. P. 697.
6. Seifert T. et al. Terahertz Spin Currents and Inverse Spin Hall Effect in Thin-Film Heterostructures Containing Complex Magnetic Compounds // SPIN, 2017. Vol. 07. № 03. P. 1740010.

УДК 621.384.64; 538.945

Электромагнитные характеристики полуволновых сверхпроводящих 325 МГц резонаторов

Сухоцкий А. Е., к. ф.-м. н. Быченко Д. С., к. ф.-м. н. Гурневич Е. А.,

Волынец Г. И., Гусев С. С., д. ф.-м. н. Максименко С. А.

НИУ «Институт ядерных проблем БГУ»

220030, Беларусь, г. Минск, ул. Бобруйская, 11

aliakseisuhotski@mail.ru

Спроектирован и изготовлен коаксиальный ускоряющий полуволновой резонатор с частотой 325 МГц для сверхпроводящего ускорителя-инжектора на базе нуклотрона NICA. Представлены результаты испытаний прототипов резонаторов при нормальных условиях и в сверхпроводящем состоянии; получены экспериментальные данные для определения основных характеристик опытных образцов.

Ключевые слова: полуволновые резонаторы; сверхпроводимость; ускоритель частиц.

Большинство современных ускорительных комплексов включает в свой состав нормально- и сверхпроводящие магниты, а также нормально-проводящие и сверхпроводящие радиочастотные резонаторы для ускорения частиц. Магниты фокусируют либо изгибают пучки в кольцевых ускорителях, а быстро изменяющиеся во времени высокочастотные электрические поля в объеме резонаторов используются для ускорения заряженных частиц. Магнитные и высокочастотные системы составляют наибольшую долю в технологической сложности и стоимости строительства ускорителей высокоэнергетических пучков, поэтому разработка эффективных полуволновых резонаторов имеет существенное практическое и экономическое значение [1–2].

В представленной работе приводятся результаты исследований электромагнитных свойств сверхпроводящих резонаторов, полученные на этапе криогенных испытаний при температуре жидкого гелия. Исследование характеристик резонаторов в сверхпроводящем состоянии является важнейшим и наиболее сложным этапом в технологии производства резонаторов. Именно на этом этапе исследований проявляются эффекты, связанные с качеством сварных швов, чистотой материала, качеством поверхности, наличием в резонаторе микрочастиц пыли и др. В нормально проводящем состоянии эти эффекты практически не заметны. Контроль свойств в сверхпроводящем состоянии необходим для проверки тщательности проведения всех этапов производства резонаторов [3–4].

Литература

1. Bychanok D., Sukhotski A., Huseu S., Vasilevich E. et al. Control of electromagnetic properties during prototyping, fabrication and operation of low- β 325 MHz half-wave resonators // Journal of Physics D: Applied Physics, 54 (25), 255502.
2. Bychanok D., Huseu S., Vasilevich E., Sukhotski A., Bayev V., Maksimenko S., Gusarova, Lalayan M., Polozov S., Shvedov A., Yurevich S., Petrakovskiy V., Pokrovskiy A., Nikiforov D., Butenko A., Syresin E. Design and characteristics of cryostat for testing of low-beta 325 MHz half-wave resonators // 27th Russian Particle Acc. Conf. (RuPAC-2021), Alushta, Russia, DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA16.

3. Bychanok D., Huseu S., Maksimenko S.A., Sukhotski A., Bayev V., Butenko A.V., Syresin E., Gusarova M., Lalayan M.V., Polozov S.M., Petrakovsky V.S., Pokrovsky A.I., Shvedov A., Yurevich S.V., Tamashevich Y. Comparison of electromagnetic properties during fabrication of copper and niobium prototypes of 325 MHz coaxial half-wave resonator // 2021 International Conference on RF Superconductivity (SRF21), paper WEP0AV010.
4. Powers T. Theory and practice of cavity rf test systems // Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity, Cornell University, Ithaca, New York, USA.

Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
125319, Москва, а/я 91
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru

Реклама в книгах:

- модульная
- статьи

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphera.ru>

**Российский форум «Микроэлектроника 2023»
9-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов**

**Парк науки и искусства «Сириус»,
9–14 октября 2023 г.**

Компьютерная верстка – ИП Автушенко Р.В.
Дизайн – Н.И. Семякина
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

Подписано в печать 06.10.2023
Формат 60×90/16
Гарнитура «Ньютон»
Печ. л. 62.

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2

ПАРТНЕРЫ РОССИЙСКОГО ФОРУМА «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023»

При поддержке



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Элемент

Организаторы



Генеральные партнеры



Официальный партнер



Атомный партнер



Технологический партнер



Иновационные партнеры



Финансовый партнер



Партнер деловой программы



Партнер Школы молодых ученых



Спортивный партнер



Образовательный партнер



Партнеры



Оператор



Стратегический информационный партнер



Генеральный информационный партнер

