

ННБ XIV, Санкт-Петербург, 14-16 мая 2026

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»

ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



Сборник материалов конференции
16 – 18 мая 2026

Том VI

Санкт-Петербург
2026

УДК 001.2

XIV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Том 6. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026. 155 с.

Организаторы:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Тематика конференции включает следующие направления

- *Информационные радиотехнические системы и устройства*
- *Информатика и управление в технических системах и ВТ*
- *Программная инженерия и автономные интеллектуальные системы*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Алгоритмическая математика*
- *Управление и обработка информации*
- *Приборостроение*
- *Лингвистика*
- *Электроника, нанотехнологии, наноматериалы*
- *Системный анализ и информационная безопасность*
- *Электрические системы, привод, автоматика и электротехнологии*
- *Биотехнические системы и технологии*
- *Техносферная безопасность*
- *Реклама и связи с общественностью*
- *Современные тренды управления качеством и цифровая экономика*
- *Инновационное проектирование: от реальных объектов к цифровым двойникам.*

Основной задачей конференции является развитие творческой активности студентов, привлечение их к решению актуальных задач в области науки и техники.

Сборник материалов содержит доклады, представленные на XIV Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, состоявшейся 16 – 18 мая 2026 года в Санкт-Петербурге, рекомендованные к публикации. Все доклады проходят рецензирование.

Оглавление

ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ	5
КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АНОДОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ	5
МАНУШКИН А.В.1, 2, ИВАНОВ Н.А.2	5
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК HfO₂ ДЛЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ	13
МОХНАТКИН Н.А. ¹ , ПЕРМЯКОВ Н.В. ¹ , НЕСТЕРОВ И.А. ²	13
ДЕНДРИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ НАНОАРХИТЕКТОНИКИ	17
ШМАТОК Е. В. ¹ , МУРАТОВА Е. Н. ¹ , МОШНИКОВ В. А. ¹ , ВРУБЛЕВСКИЙ И.А. ²	17
ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА» - И НДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР СПБГЭТУ «ЛЭТИ» В ОБЛАСТИ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА НАНОАРХИТЕКТОНИКИ	20
КОЗОДАЕВ Д.А. ¹ , МОШНИКОВ В. А. ² , МУРАТОВА Е. Н. ² , ЯКОВЛЕВА А.А. ¹	20
ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ФИС	23
НАЗАРОВ А.Н., ЕЛАНСКАЯ К.Г., АГАФОНОВА Д.С.	23
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА.....	26
НАЙМАРК А.А., ПОПОВ Е.С., БУЙ К.Д.	26
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ В ДЕТЕКТОРЕ SPD STRAW TRACKER НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA	29
НАРТОВ А.Р.	29
МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ЁМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНОГО РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО КОНДЕНСАТОРА.....	33
НАУМЕНКО А.О., ПОЛЯКОВ Д.А.	33
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА INSB В ПРОЦЕССЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ РЕЗКИ.....	36
НЕСТЮРКИН М.С.1, 2, ПОДГОРНЫЙ Д.А 2, АБДУРАГИМОВ Б. 2,3.....	36
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА АВТОЭМИССИОННОГО ТОКА	39
НЕЧАЕВ М.С.1, СОКОВ С.А.1, ШИГАРОВА А.С.1,2, ЧЕНЦОВА Н.В.1,2, КОЛОСЬКО А.Г.1, ФИЛИППОВ С.В.1, ПОПОВ Е.О.1	39
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНВЕРСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	43
НИКУРАДЗЕ П.А.1, ИВАНОВ А.Г.1, ЮРЧЕНКОВ М.И.1, КАРПОВ Д.А.1	43

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	48
Новиков И.А.,2.....	48
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ 3D- ПЕЧАТИ МЕТОДОМ SLS.....	51
Нэту М.Л., Михайлов И.И.....	51
АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ GASE МЕТОДОМ ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ	55
Онищенко Н. И., Шемухин А. А.	55
РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО ПЕЛЕНГАТОРА.....	58
Орлов Д.П.	58
ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ СФЕР ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ЗОНДОВ АСМ	59
Павлов К.А., Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М.	59
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ СОСТОЯНИЙ В МОП-СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ 4H-SiC/SiO₂	63
Паламарчук М.О., Афанасьев А.В., Восколович А.В., Тertyшная Е.А., Чигирев Д.А.,Серков А.В.	63
РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К УВЕЛИЧЕНИЮ АДГЕЗИИ МЕДНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ, К ПОЛИИМИДНЫМ ПОДЛОЖКАМ	66
Пилипчук А.В. ¹ Афанасьева Е.А. ²	66
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	70
Полидаускайте А.В., Ситков Н.О., Хмельницкий И.К. ¹	70
ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ И СТМ ТОПОГРАФИИ РЕКОНСТРУКЦИЙ C(4X2) И P(2X2) ПОВЕРХНОСТЕЙ Si(100) И Ge(100)	73
Ремеле В.Е., Кузьмин М.В.	73
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И РАБОТУ ВЫХОДА СЛОЁВ MoTe₂ И WSe₂ НА ПОДЛОЖКАХ Gr/SiC.....	76
Родиончикова А.Д. ^{1,2}	76
РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ SPI-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КМОП-ФОТОПРИЁМНИКОВ	79
Романов А.Ю.	79
РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ЧИПА И МЕТОДА ЭКСПЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТИВОРАКОВОГО ПРЕПАРАТА БИКАЛУТАМИДА	86
Руч С.Д.....	86

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ	90
САЙГУШЕВА А.В. ¹	90
ИССЛЕДОВАНИЕ ПИЛООБРАЗНОГО МИКРОФЛЮИДНОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕШИВАНИЯ СУСПЕНЗИИ МИКРООРГАНИЗМОВ И РАСТВОРОВ АНТИБИОТИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ	94
СИБГАТОВ Р. Р. ¹ , КОМАРОВ А.А. ¹	94
ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ РОСТА КРИСТАЛЛОВ.....	97
СЛАУТИНА О.А., ВОЛЯНЮК А.Ю., АНУФРИЕВ И.Е.	97
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО МИКРОРЕАКТОРА НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ТЕРАНОСТИЧЕСКИХ АГЕНТОВ	101
СМИРНОВ Е.А. ^{1,2}	101
ГИБРИДНО – ИНТЕГРИРОВАННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА ЧИПЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОРАКОВЫХ ПРЕПАРАТОВ.	105
СОЛОВЬЯН Д.И. ¹ , ЗИМИНА Т.М. ¹ , ФЁДОРОВ В.С. ²	105
О КРИТЕРИИ БЕЗДИСЛОКАЦИОННОГО РОСТА В МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ INGAASP/INP	107
СОРОКИН Д.С., ГРИШИН А. Е., СМАРАГДОВ Д.С.....	107
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ SiC-СТРУКТУР СО СВЕРХТОНКИМИ И СВЕРХТОЛСТЫМИ СЛОЯМИ	112
СУББОТИНА А.С. ^{1,2} , ПАНОВ М.Ф. ¹	112
РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НАБОРА ДАННЫХ ПРИ СПИРАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ	115
ТИМОФЕЕВ А.А. ¹	115
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕРИНГА СЕРЕБРА ДЛЯ МОНТАЖА SiC ПРИБОРОВ.....	119
ТИУНОВ Д.С.; БРОЙКО А.П.; БОХОВ О.С.....	119
МЕТОДИКА ВЫБОРА VSIM-МОДЕЛЕЙ И САПР ДЛЯ ЗАДАЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	122
ФЕОКТИСТОВА В.С., ПОЛЯКОВ Д.А.	122
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНОДИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА ДЛЯ БИОСЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ.....	126
ХАСАНОВА Д.И., МУХАМЕДЖАНОВА В.Р., ГОРОЧНЫЙ А.В.	126

РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ИГРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ	128
Хингелов Г.А., Хакимов М. Ф., Муратова Е. Н.	128
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (АСМ) С АНАЛИЗОМ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА	131
Храмов М. М.....	131
МОДИФИКАЦИЯ ГРАФЕНА НА НИКЕЛЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРКАЛЯЦИИ АТОМОВ КОБАЛЬТА И КРЕМНИЯ	136
Цветков Т.Д. ^{1,2} , Гребенюк Г.С. ¹ , Кузьмин М.В. ¹	136
СРАВНЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР GESN/GE/SI	139
Чуманов И.В. ¹ , Хахулин С.А. ¹ , Фирсов Д.Д. ¹ , Комков О.С. ¹	139
ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВАХ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ СО СБОРОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	142
А.С. ШИГАРОВА ^{1,2} , Н.В. ЧЕНЦОВА ^{1,2} , С.А. СОКОВ ^{1,3} , А.Г. КОЛОСЬКО ¹ , С.В. ФИЛИППОВ ¹ , Е.О. ПОПОВ ¹	142
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ И РЕКОМБИНАЦИЮ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПЕРОВСКИТ-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ	146
Шипков В.И. ¹ , Гец Д.С. ¹	146
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ	148
Шмелева Е.А.	148
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ АНОДНОГО ТРАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ	151
Яковлева У.А.	151

ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АНОДОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

МАНУШКИН А.В.^{1, 2}, ИВАНОВ Н.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И.

¹Ульянова (Ленина), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, ИрНТУ, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы современных литий-ионных аккумуляторов. Проанализированы фундаментальные ограничения и механизмы деградации литий-ионных энергоносителей. Особое внимание уделено вопросам создания композитных материалов на основе углерода, а также их композитам с пористым кремнием. Предложены перспективные методы синтеза таких композитов и проблемы, решение которых могут обеспечить кремний-углеродные композиты.

Ключевые слова: пористый кремний, мезопористые углеродные сферы, темплатный метод, углеродная матрица, углеродная оболочка

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) в настоящее время являются одним из самых распространённых портативных энергоносителей в мире. Но существенным недостатком является то, что со временем ЛИА теряют свою максимальную емкость – это неизбежный процесс деградации, обусловленный рядом физико-химических механизмов. С увеличением энергоемкости литий-ионных носителей дополнительно появляются проблемы с долговечностью.

Понимание механизма деградации литий-ионных аккумуляторов как на аноде, так и на катоде основано на следующих проблемах:

- Неуправляемый рост межфазной плёнки (SEI) [1];
- Литиевые дендриты;
- Структурная усталость, трещины;
- Химическое “отравление” и разложение катода.

На аноде ЛИА – происходит больше всего деструктивных процессов, напрямую влияющие на долговечность батареи. При первом же заряде на поверхности анода образуется тонкая твёрдоэлектролитная плёнка (Solid-Electrolyte Interphase, SEI). Это защитный слой, который пропускает ионы лития, но изолирует электрод от дальнейшего разложения электролита. При каждом цикле заряда-разряда анод расширяется и сжимается, что приводит к микротрещинам на SEI плёнке. В свою очередь, на месте трещин для восстановления пассивирующего слоя расходуются новые порции ионов лития и электролита, - это приводит к необратимой потере активного лития и внутреннему сопротивлению ввиду разрастанию SEI плёнки.

Литиевые дендриты образуются в процессе осаждения ионов лития на аноде при определенных условиях, например, быстрой зарядке или низкой температуре окружающей среды [2]. В последствии, дендриты могут обламываться, теряя электрический контакт с анодом, и превращаться в “мёртвый литий” – балласт, не участвующий в жизненном цикле литий-ионного аккумулятора.

Сегодня одним из путей развития ЛИА является кремний ввиду его огромной теоретической емкости около 4000 мА·ч/г [3, 4]. Однако при внедрении ионов лития стоит учитывать, что кремний разбухает в объеме более чем на 300%. Циклы набухания и последующего сжатия приводят к растрескиванию и полному разрушению кремниевых частиц, а также к разрушению SEI-плёнки. В дополнение, кремний является полупроводником с недостаточно высокой проводимостью, вызывая локальный перегрев при электронном транспорте в процессе зарядки-разрядки аккумулятора. В толстых электродах диффузия лития вглубь кремния медленная, зачастую при низких температурах.

Мезопористые углеродные материалы

Мезопористые углеродные материалы (МУМ) – это класс наноструктурированных материалов с пора́ми размером от 2 до 50 нм. Их уникальные свойства обусловлены высокой удельной поверхностью, что обеспечивает эффективное взаимодействие с молекулами газов, жидкостей или ионами. Размер, форма и распределение пор регулируются методами синтеза,

позволяя адаптировать материал под задачи, например, сорбции крупных молекул или катализ.

Уникальные свойства МУМ обусловлены высокой удельной поверхностью, обеспечивая эффективное взаимодействие с молекулами газов, жидкостей или ионами. Разработка МУМ – этап развития темплатного синтеза мезопористых материалов. Одним из распространённых методов синтеза является гидротермальная карбонизация на шаблоне, которым зачастую являются монодисперсные наносферы из аморфного диоксида кремния (рис. 1) из-за его стабильности при температуре, необходимой для отверждения углеродсодержащего компонента, и простоты удаления шаблона с помощью химических травителей [5].

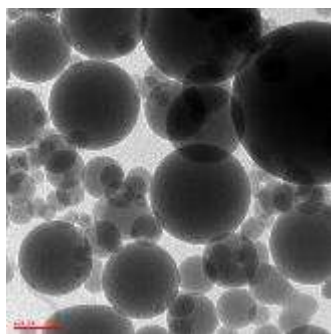


Рис. 1. Наносферы аморфного диоксида кремния. Масштаб изучения – 100 нм



Рис. 2. Получение МУМ с использованием твёрдого шаблона

Матрицы для синтеза наночастиц и наноматериалов разделяют на твердые матрицы (шаблоны, темплаты) такие, как пористые материалы (цеолиты, мембраны), и на мягкие матрицы - структуры, образующиеся при самоорганизации поверхностно-активных веществ и полимеров [6].

Обозначение “мягкая матрица” обычно применяется к структурированному фрагменту органического вещества, такому как белок, мицелла ПАВ или полимер, который сохраняет пространство во время сборки углеродного каркаса и будет удален на стадии экстракции растворителем или с помощью пиролиза с получением структурированного углеродного материала.

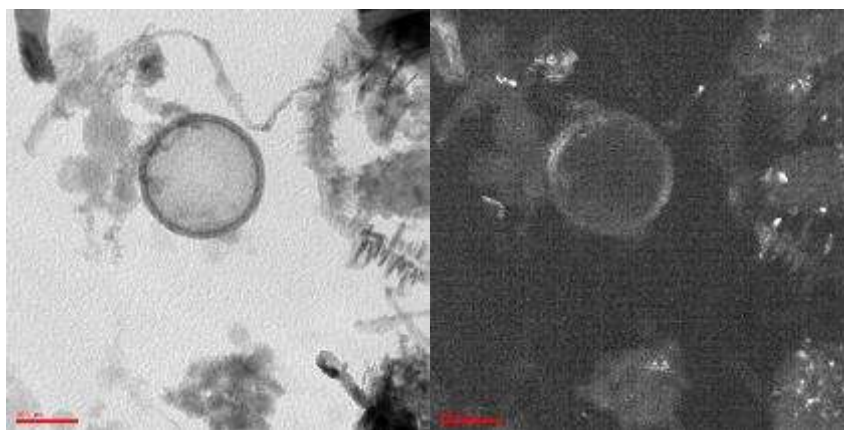


Рис. 3. (а) ПЭМ-изображение сферической поллой углеродной сферы, (б) ПЭМ-изображение сферической поллой углеродной сферы в режиме «Тёмное поле». Мерцание в объёме исследуемого участка свидетельствует о кристаллической природе частиц. Масштаб изучения – 100 нм

Вопрос кристалличности полученной сферы с изображения в режиме «темное поле» просвечивающей электронной микроскопии является дискуссионным. Атомная структура полученных углеродных сфер, предположительно, представляет собой квазикристалл, за счёт которой температурная стабильность таких сфер несколько выше температуры сгорания аморфного углерода [7]. Опыт исследования термической стабильности квазикристалличности МУМ, в отличие от аморфного углерода, основан на серии экспериментов изохронного отжига на воздухе в муфельной печи. Для детального описания полученной структуры требуется провести дополнительный анализ.

Развитая пористая структура МУМ создаёт дополнительное пространство для активного материала, одновременно стабилизируя его. В композитах «кремний-углерод» поры кремния и углеродная оболочка могут обеспечивать беспрепятственный доступ электролита, высокую электропроводность и поглощение объёмного расширения кремния при зарядке, что может привести к высокой ёмкости и стабильности при циклировании.

Создание гибридного электродного материала, в котором наночастицы пористого кремния инкапсулированы в мезопористую углеродную матрицу, позволят решить проблему разрушения кремниевого анода при циклировании [8, 9]. Углеродный каркас служит буфером объёмного расширения кремния, стабилизатором SEI плёнки и может являться высокопроводящим транспортным каналом в литий-ионном энергоносителе. Такие композиты превосходят чистый кремний и чистый графит по ёмкости и долговечности.

Одним из методов инкапсулирования пористого кремния является химическое осаждение из газовой фазы. Этот метод позволит улучшить удельную ёмкость электрода до 1200-1500 мА·ч/г (против 350 у графита и 3000 у чистого кремния с сильно ограниченными циклами зарядки-разрядки), сохранение ёмкости после сотен циклов, а также улучшить скорость зарядки аккумуляторов без образования литиевых дендритов.

Заключение

Проведённое исследование показало, что современная энергетика сталкивается с целым рядом серьёзных вызовов. Основные трудности связаны с деградацией литий-ионных энергоносителей. Особенно остро стоит проблема использования кремния в качестве анода, что может привести к проблемам долговечности батарей на его основе. На производственном уровне требуются прорывные решения в области композитных материалов. Перспективы развития видятся в создании кремний-углеродных композитов,

способных улучшить физико-химические процессы жизненного цикла аккумуляторов. На эти композиты возложены большие надежды ввиду увеличения удельной ёмкости, срока службы и стабильности электродов на их основе. Ввиду уникальных свойств углерода в наномасштабе требуются дополнительные исследования структуры материалов на основе него, а также тщательная разработка методов синтеза стабильных кремний-углеродных материалов.

Список литературы

1. Esmaeilpour M. et al. A Solution-Mediated Pathway for the Growth of the Solid Electrolyte Interphase in Lithium-Ion Batteries //Advanced Energy Materials. – 2023. – V. 13. – №. 14. – P. 2203966.
2. Liu Y. et al. Lithium dendrite growth, evolution, inhibition in lithium-ion batteries //Journal of Energy Storage. – 2025. – V. 138. – P. 118559.
3. Vorauer T. et al. Impact of solid-electrolyte interphase reformation on capacity loss in silicon-based lithium-ion batteries //Communications Materials. – 2023. – V. 4. – №. 1. – P. 44.
4. Jang J., Kwon T. Various Technologies to Mitigate Volume Expansion of Silicon Anode Materials in Lithium-Ion Batteries //Batteries. – 2025. – V. 11. – №. 9. – P. 346.
5. Галеев, В. Г. Синтез полых углеродных наносфер на темплатах наносилики рукавной пыли кремниевого производства / В. Г. Галеев, С. А. Небогин, Н. А. Иванов // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 632-638. – EDN JBQOAR.
6. Gong Y. et al. Bottom-up hydrothermal carbonization for the precise engineering of carbon materials //Progress in Materials Science. – 2023. – V. 132. – P. 101048.
7. Panickar R., Sobhan C. B., Chakravorti S. Chemical vapor deposition synthesis of carbon spheres: Effects of temperature and hydrogen //Vacuum. – 2020. – V. 172. – P. 109108.
8. Способ получения функционализированной наноструктуры на основе пористого кремния. Спивак Ю.М., Мошников В.А., Смердов Р.С., Герасимов В.И., Сомов П.А., Бизяев И.С., Гагарина А.Ю. // Патент на изобретение RU 2796247 C1, 18.05.2023. Заявка № 2022122510 от 19.08.2022.
9. Advances in novel low-macroscopic field emission electrode design based on fullerene-doped porous silicon/ Smerdov R., Mustafaev A., Spivak Y., Moshnikov V., Bizyaev I., Somov P., Gerasimov V. // Electronics. 2021. V. 10. № 1. P. 1-13.

АКТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДОВ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ

МЕШКОВ А. Л.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ленина (Ульянова)

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию актуальных решений, направленных на адаптацию фотонных интегральных схем на основе волноводов из нитрида кремния для приёма, обработки и передачи оптических сигналов. Такие схемы предоставляют возможность обработки сигналов на центрах обработки данных без оптоэлектронного преобразования, при этом внося малые оптические потери в сигнал как при распространении внутри ФИС, так и на стыках с оптическим волокном. Для осуществления исследования произведён обзор актуальных решений для ФИС на основе волноводов из нитрида кремния для телекоммуникационных применений.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, нитрид кремния, волновод, оптический сигнал.

Введение

Фотонные интегральные схемы (ФИС) на данный момент являются перспективной технологией, которая, в отличие от традиционных электронных интегральных схем, позволяет обеспечивать обработку оптических сигналов без оптоэлектронного преобразования. По состоянию на сегодняшний день существует множество архитектур исполнения фотонных интегральных схем. Таковой является архитектура ФИС на основе

волноводов из нитрида кремния (Si_3N_4). Одним из главных преимуществ платформ на основе волноводов из нитрида кремния является низкий показатель преломления нитрида кремния по сравнению с кремнием ($n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2$, $n_{\text{Si}} = 3,5$) [1]. Это обеспечивает меньший контраст показателей преломления волноводной части и оболочки диоксида кремния ($n_{\text{SiO}_2} = 1,45$). Как следствие, меньшее влияние шероховатости граней на оптические потери при распространении. Платформы ФИС на основе нитрида кремния высоко совместимы с КМОП-технологией интегральных схем. Также, нитрид кремния, в отличие от кремнезёма, позволяет обеспечивать высокую нелинейность эффектов Керра ($2,4 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{Вт}$) [2]. Таким образом, в платформах на основе волноводов из нитрида кремния повышается качество электрооптической модуляции, что является важным обстоятельством при обработке сигналов, в том числе в телекоммуникационных применениях и обработке оптических сигналов.

Технологический процесс производства волноводов

Процесс производства волноводов из нитрида кремния напрямую влияет на качество распространения оптических сигналов в фотонных интегральных схемах. От данного процесса зависит, как изменятся оптические потери в волноводах при разных методах производства. Основные методы изготовления волноводов – химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении (LPCVD) и низкотемпературное плазмохимическое осаждение (PECVD). При применении метода PECVD в волноводе появляются водородные связи кремния и азота, из-за чего происходит увеличение оптических потерь сигнала и необходимо применять термический отжиг для уменьшения потерь [2]. Однако, при применении метода LPCVD с увеличением толщины слоя нитрида кремния увеличиваются механические напряжения, что приводит к образованию трещин и, следовательно, увеличению оптических потерь сигнала [2]. На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента передачи от процесса изготовления и ширины волновода.

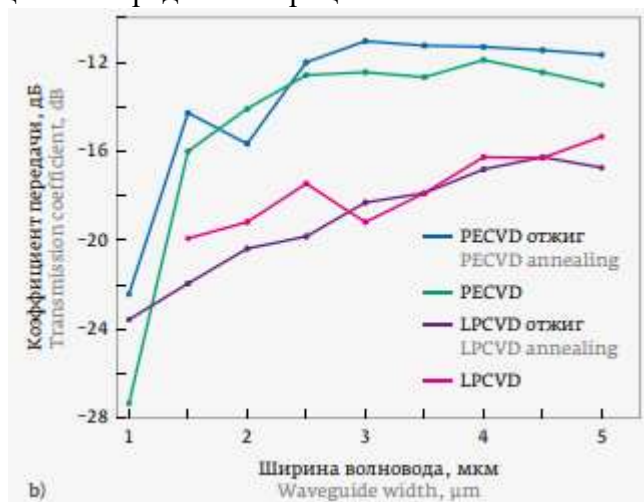


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи оптического сигнала от ширины волновода [2]

В то же время, разработан метод изготовления нитрид кремниевых волноводов, в котором появляется возможность не применять термический отжиг (более 1000°C). В методе плазмохимического осаждения с индуктивно связанной плазмой (ICP-PECVD) при замене в главных реагентах (силан и аммиак) атома водорода на утяжелённый изотоп водорода – дейтерий (соответственно, SiD_4 и ND_3), представляется возможным снижение

потерь в нитрид кремниевых волноводах до уровней: 8,66 дБ/м при толщине волновода 800 нм и 1,77 дБ/м при толщине волновода 80 нм [3]. Это достигается благодаря тому, что дейтериевые связи в данном методе заменяют водородные и, следовательно, не происходит резонансного оптического поглощения в области телекоммуникационных длин волн (С-диапазон, 1530 – 1565 нм), как это происходит при наличии водородных связей.

Таким образом, при применении метода ICP-PECVD с дейтерийсодержащими реагентами, оптимизируется процесс производства волноводов из нитрида кремния. Данное обстоятельство даёт возможность как изготавливать волноводы, которые не подвержены влиянию механических повреждений, а значит, и не подвержены дефектам, так и не применять термический отжиг, тем самым, не оказывать высокотемпературное воздействие на ФИС (более 1000 °С), что может привести к выводу из строя приборов ФИС, которые разрушаются или деградируют при воздействии высоких температур. Следовательно, из рассмотренных методов изготовления волноводов из нитрида кремния наиболее перспективным является ICP-PECVD с дейтерийсодержащими реагентами.

Интеграция ФИС на нитрид кремниевых волноводах с волоконной оптикой

Интеграция фотонных интегральных схем с волоконной оптикой, и в частности, с волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) является одним из ключевых аспектов в телекоммуникационных применениях. В межсоединениях оптических волокон и волноводных структур фотонных интегральных схем необходимо минимизировать оптические потери мощности и рассогласование. Одним из решений данной задачи для стандартного оптического волокна SMF-28 (диаметр сердцевины 8,2 мкм, диаметр оболочки 125 мкм) является применение конусообразной волноводной структуры из нитрида кремния с несколькими остриями, изображённой на рисунке 2 [4]. Оптимальными значениями для данной структуры являются: длина наконечника (tip length) = 220 мкм, начальная ширина наконечника (tip start width) = 100 нм, длина соединения (connect length) = 5 мкм и длина конуса (taper length) = 40 мкм. При таких размерах волноводной структуры оптические потери мощности на межсоединениях авторам удалось снизить с 2,52 до 0,51 дБ на грань в С-диапазоне длин волн [4].

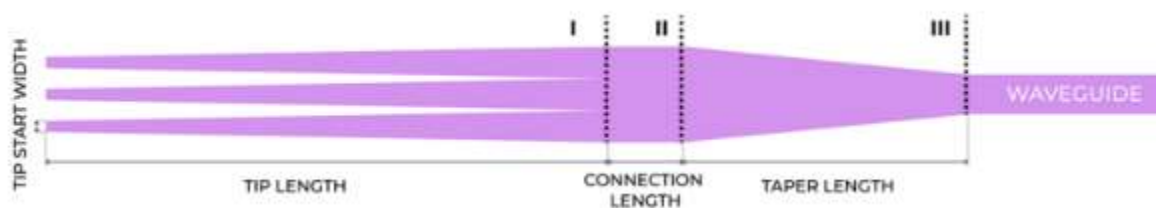


Рис. 2. Эскиз волноводной структуры на межсоединении [4]

Таким образом, данная конструкция волновода позволяет осуществлять согласование ФИС на основе нитрид кремниевых волноводов на межсоединениях с оптическим одномодовым волокном SMF-28, при том, с небольшими оптическими потерями мощности в С-диапазоне длин волн сигнала, порядка 0,51 дБ на грань.

Приборы ФИС на основе нитрид кремниевых волноводов

Приборы в составе ФИС играют главную роль в обработке оптических сигналов. Основными приборами, выполненными на основе волноводов из нитрида кремния,

являются электрооптические модуляторы на основе кольцевых резонаторов и интерферометров Маха-Цендера.

Микрокольцевые резонаторы (МКР) в ФИС применяются, по большей части, как малогабаритные электрооптические модуляторы [5]. В работе [6] представлен электрооптический модулятор на основе МКР из нитрид кремниевых волноводов толщиной 300 нм и диаметром кольца 20 мкм. В данной схеме активный слой состоит из оксида индия-олова, на которых располагаются золотые контакты для подачи электрического напряжения. Заявляется, что данное устройство имеет возможность производить электрооптическую модуляцию сигнал с шириной полосы 46 ГГц при вносимых потерях 0,24 дБ [6]. Таким образом, это обстоятельство позволяет передавать оптический сигнал со скоростью 30 Гб/с с применением модуляции вида OOK (On-Off-Key).

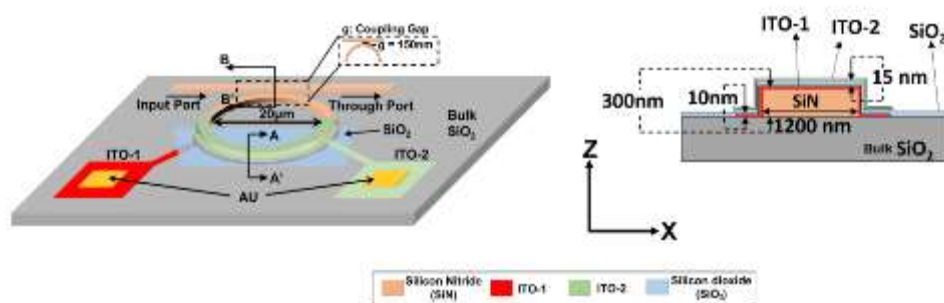


Рис. 3. Схема электрооптического модулятора на микрокольцевом резонаторе [6]

Электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера работает на принципе разности хода фаз пучков, разделённых на входе интерферометра. Управление над оптическим сигналом производится с помощью воздействия на показатель преломления электрического поля. В статье [7] рассматривается электрооптический модулятор Маха-Цендера на основе нитрид кремниевых волноводов толщиной 300 нм на плёнке из ниобата лития 300 нм, который является активным слоем для электрооптической модуляции. Данный прибор показал основные результаты: оптические потери мощности 0,1 дБ/см и ширину полосы модуляции более 200 ГГц, что позволит передавать данные со скоростью более 100 Гб/с.

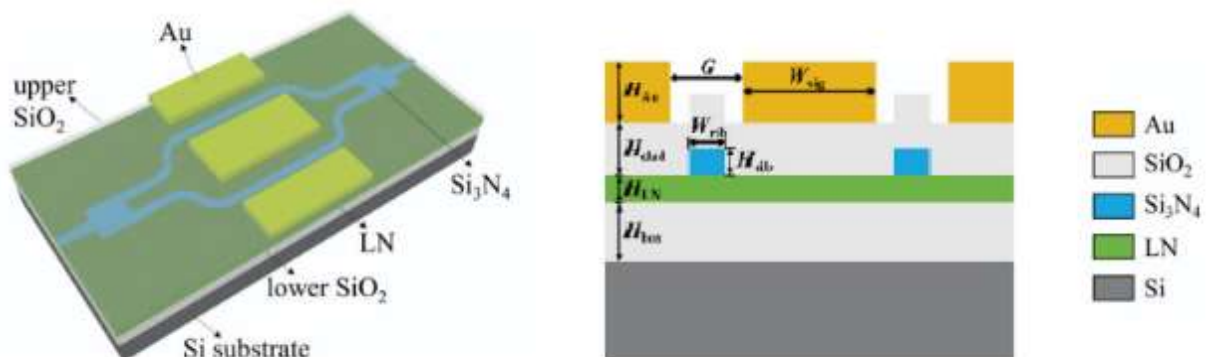


Рис. 4. Схема электрооптического модулятора на интерферометре Маха-Цендера [7]

Заключение

В данной работе рассмотрены основные разработки, которые на данный момент являются актуальными решениями при проектировании и разработке фотонных интегральных схем на основе волноводов из нитрида кремния. Определены и систематизированы основные стратегии для адаптации ФИС на основе нитрид кремниевых волноводов в телекоммуникационных применениях. Приведённые решения могут стать базой для применения ФИС в передаче и обработке данных, что поспособствует миниатюризации телекоммуникационного оборудования и отсутствию необходимости оптоэлектронного преобразования сигнала.

Список литературы

1. Q. Wilmart, H. El Dirani, N. Tyler, D. Fowler, S. Malhouitre, S. Garcia, M. Casale, S. Kerdiles, K. Hassan, C. Monat, X. Letartre, A. Kamel, M. Pu, K. Yvind, L. K. Oxenløwe, W. Rabaud, C. Sciancalepore, B. Szlag, S. Olivier. A Versatile Silicon-Silicon Nitride Photonics Platform for Enhanced Functionalities and Applications //Applied Science. – 2019. – С. 16.
2. А. А. Никитин, К. О. Воропаев, А. А. Ершов, И. А. Рябцев, А. В. Кондрашов, М. В. Парфенов, А. А. Семенов, А. В. Шамрай, Е. И. Теруков, А. В. Петров, А. Б. Устинов. Исследование технологии осаждения пленок нитрида кремния для применения в фотонных интегральных схемах //Фотоника. – Т. 16. – №4. – 2022. – С. 296-304.
3. D. Bose, M. W. Harrington, A. Isichenko, K. Liu, J. Wang, N. Chauhan, Z. L. Newman, D. J. Blumenthal. Anneal-free ultra-low loss silicon nitride integrated photonics //Light: Science & Applications. – 2024. – С. 13.
4. S. S. Avdeev, A. S. Baburin, E. V. Sergeev, A. B. Kramarenko, Arseniy V. Belyaev, D. V. Kushnev, K. A. Buzaverov, I. A. Stepanov, V. V. Echeistov, A. S. Loginov, S. V. Bukatin, A. Sh. Amiraslanov, E. S. Lotkov, D. A. Baklykov, I. A. Rodionov. High-Efficiency Fiber Edge Coupling for Silicon Nitride Integrated Photonics //Micromachines. – 2025. – С. 16.
5. Д. Е. Артемов, А. В. Бучинский, А. П. Смирнов, А. А. Ершов, А. А. Никитин, А. Б. Устинов, В. Н. Трещиков, А. И. Федосеев. Добротность микрокольцевых резонаторов: методика расчета и эксперимент //Журнал технической физики. – Т. 95. – Вып. 6. – 2025. – С. 1183-1190.
6. V. S. P. Karempudi, I. G. Thakkar, J. T. Hastings. A Silicon Nitride Microring Modulator for High-Performance Photonic Integrated Circuits //Optics Letters. – 12 Jun 2023. – С. 4.
7. R Zhao, H Z Weng, and Q Wan, Optimal design of heterogeneously integrated silicon nitride-lithium niobate modulator[J]. J. Semicond., 2026, 47(6): 062401 doi: 10.1088/1674-4926/25120032

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК HfO₂ ДЛЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

МОХНАТКИН Н.А.¹, ПЕРМЯКОВ Н.В.¹, НЕСТЕРОВ И.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И.

Ульянова (Ленина)

²АО «НПП «ЭЛАР»

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров реактивного ВЧ-магнетронного распыления на оптические характеристики тонких пленок диоксида гафния (HfO₂), наносимых на кремниевые подложки КДБ (100). В качестве изменяемых параметров выбраны мощность разряда (500–800 Вт) и соотношение рабочих газов аргон/кислород (от 3:1 до 3:3). Оптические константы пленок (толщина и показатель преломления) определялись методом спектральной эллипсометрии. Полученные данные могут быть использованы для экспресс-настройки процессов осаждения при изготовлении оптических покрытий для кремниевых фотоприемных устройств.

Ключевые слова: диоксид гафния, магнетронное распыление, показатель преломления, просветляющее покрытие, фоточувствительные структуры, спектральная эллипсометрия

В современной микро- и оптоэлектронике диоксид гафния (HfO₂) занимает особое место благодаря высокому значению диэлектрической проницаемости ($k \approx 20-25$), широкой

запрещенной зоне ($\sim 5,6$ эВ) и высокой химической стойкости [1, 2]. В качестве однослойного просветляющего покрытия для фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) используются пленки диоксида гафния (HfO_2). Они позволяют минимизировать оптические потери за счет согласования показателя преломления с теоретическим оптимумом для подложки из кристаллического кремния ($n \approx 1,9\text{--}2,0$ в видимой и ближней ИК-областях) [1].

Диоксид гафния в объемном состоянии обладает показателем преломления в диапазоне $1,95\text{--}2,05$ при длинах волн $500\text{--}800$ нм и коэффициентом экстинкции, близким к нулю, что делает его перспективным материалом для оптических покрытий [1]. Метод магнетронного распыления обеспечивает высокую производительность, хорошую адгезию и возможность масштабирования [2, 3].

Однако оптические и структурные характеристики пленок, получаемых методом магнетронного распыления, существенно зависят от технологических параметров: мощности разряда, состава рабочей газовой смеси, давления и температуры подложки. В связи с этим каждый технологический маршрут требует калибровки для достижения заданных оптических констант в конкретных условиях технологического оборудования [1].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния мощности магнетронного разряда и соотношения газов аргон/кислород на толщину и показатель преломления пленок HfO_2 , наносимых на монокристаллические кремниевые подложки. Полученные данные представляют промежуточный этап разработки технологического режима получения просветляющих покрытий для ФПЗС и могут быть использованы для экспресс-подбора параметров осаждения в лабораторных и производственных условиях.

Пленки диоксида гафния наносились на стандартные монокристаллические кремниевые подложки легированные бором с ориентацией [100] методом реактивного магнетронного распыления ВЧ-диапазона. В качестве мишени использовался диск из металлического гафния чистотой 99,99% диаметром 160 мм. Подложки перед загрузкой в вакуумную камеру подвергались стандартной химической очистке и нарезке на образцы размером 22×17 мм, которые затем фиксировались в специализированной оснастке с рабочей областью напыления 16×14 мм.

Перед каждым процессом осаждения проводился термический отжиг подложек непосредственно в камере напыления для удаления адсорбированной влаги и летучих загрязнений. Отжиг осуществлялся галогенной лампой при мощности 850 Вт. Расстояние от лампы до подложки составляло 25–30 см. Остаточное давление в камере при отжиге - порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мбар. Точное измерение температуры подложки в данной конфигурации камеры не предусматривалось, однако режим отжига обеспечивал воспроизводимые начальные условия для всех образцов.

Процессы распыления проводились в смеси аргона и кислорода при фиксированном времени осаждения 30 минут для всех образцов, что позволяло напрямую сравнивать скорости роста пленок. Изменяемыми параметрами являлись мощность ВЧ-разряда (500–800 Вт) и соотношение газов $\text{Ar}:\text{O}_2$. Среднее рабочее давление в камере в ходе процессов порядка $8 \cdot 10^{-3}$ мбар.

Перед началом основного осаждения проводилась процедура предварительного окисления мишени при мощности плазмы 600 Вт и соотношении газов 1:1. Продолжительность окисления 5 минут. Операция выполнялась при закрытой защитной

заслонке. Это необходимо для формирования устойчивого слоя диоксида гафния в рабочей зоне эрозии мишени. В дальнейшем этот оксидный слой поддерживается в состоянии динамического равновесия, скорость его распыления компенсируется скоростью окисления свежих участков мишени кислородом плазмы.

Таким образом, основной процесс протекает в стабильном оксидном режиме, при котором основными распыляемыми частицами выступают атомы и кластеры HfO_x ($x \geq 2$). Единичные атомы металлического гафния, потенциально выбиваемые из мишени, подвергаются газофазному окислению при транспортировке через кислородсодержащую плазму, что минимизирует образование металлических включений в растущей пленке.

Оптические характеристики полученных пленок (толщина d и показатель преломления n) измерялись методом спектральной эллипсометрии на приборе EC-2LED. Обработка данных выполнялась в автоматическом режиме. Оператор позиционировал образец, выбирал оптическую модель «подложка Si / однородный слой HfO_2 » и получал значения параметров, усредненные по спектральному диапазону прибора.

В результате проведенной серии экспериментов были получены пять образцов пленок HfO_2 на кремниевых подложках. Параметры процесса, оптические характеристики образцов и рассчитанные скорости осаждения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики полученных образцов

№ образца	Мощность, Вт	Ar:O ₂	d , Å	n	Скорость осаждения, Å/мин
1 (базовый)	700	3:1	680	1,97	22,7
2	500	3:1	440	1,94	14,7
3	800	3:1	1070	1,99	35,7
4	700	3:1,5	680	1,99	22,7
5	700	3:3	640	2,00	21,3

На рисунке 1 приведены фотографии полученных образцов.



а) б) в) г) д)
Рис.1. Фотографии образцов: а) – образец 1; б) – образец 2; в) – образец 3; г) – образец 4; д) – образец 5;

На рисунке 2 приведены зависимости толщины d и показателя преломления n для пленок HfO_2 от мощности ВЧ-разряда при соотношении $\text{Ar:O}_2 = 3:1$.

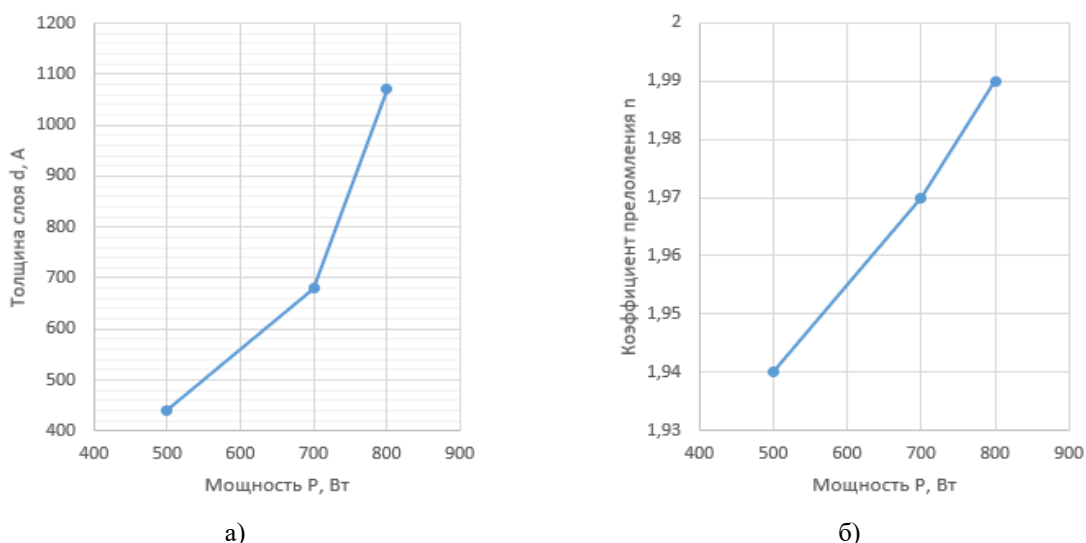


Рис.2. Экспериментальные зависимости: а) – толщина слоя от мощности разряда; б) – показатель преломления слоя от мощности разряда

На рисунке 3 приведены зависимости толщины d и показателя преломления n пленок HfO_2 от соотношения газов $\text{Ar}:\text{O}_2$ при мощности 700 Вт.

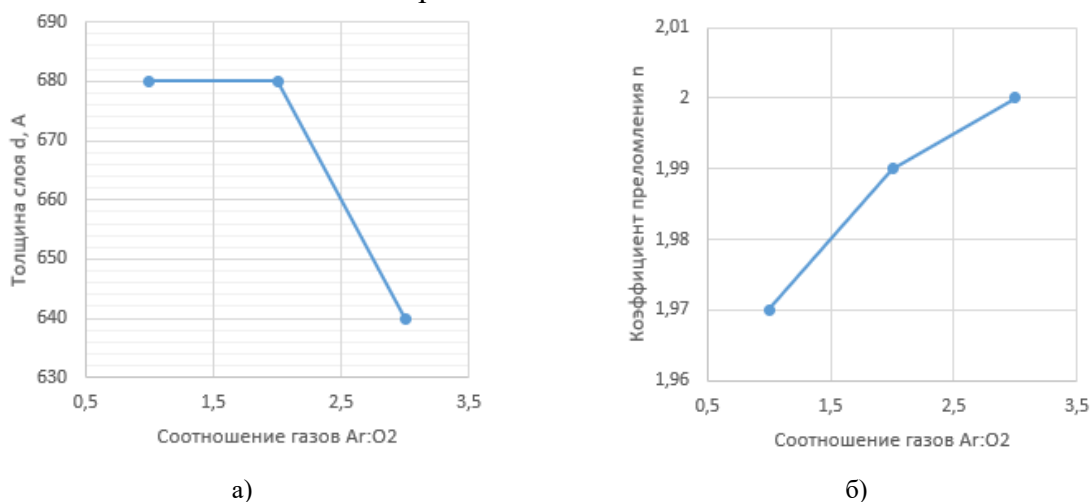


Рис.3. Экспериментальные зависимости: а) – толщина слоя от соотношения рабочих газов; б) – показатель преломления слоя от соотношения рабочих газов

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы. При увеличении мощности с 500 до 800 Вт наблюдается монотонный рост толщины покрытия с 440 до 1070 Å, что соответствует увеличению скорости осаждения с 14,7 до 35,7 Å/мин. Одновременно показатель преломления возрастает с 1,94 до 1,99.

Рост скорости осаждения с увеличением мощности обусловлен повышением энергии и потока ионов аргона, бомбардирующих оксидную поверхность мишени, что увеличивает выход распыления кластеров HfO_2 . Рост показателя преломления может свидетельствовать об уплотнении структуры пленки. Более энергичные частицы обладают большей поверхностной подвижностью, что способствует заполнению микропор и снижению дефектности покрытия [3]. Полученные значения $n = 1,94\text{--}1,99$ находятся в диапазоне, характерном для аморфного или нанокристаллического HfO_2 , полученного при умеренных температурах подложки [3].

При увеличении доли кислорода (переход от соотношения 3:1 к 3:3) толщина пленки незначительно снижается с 680 до 640 Å, тогда как показатель преломления растет с 1,97 до 2,00.

Снижение толщины пленки при увеличении доли кислорода в газовой смеси обусловлено уменьшением доли ионов аргона, обладающих большей массой и энергией, необходимых для эффективного распыления оксидной поверхности. Также изменение состава газовой смеси влияет на плазменный импеданс и эффективную мощность, передаваемую мишени. Одновременный рост показателя преломления указывает на дальнейшее улучшение стехиометрии растущей пленки [4]. Повышенное содержание кислорода в объеме камеры минимизирует образование кислородных вакансий и субоксидных фаз HfO_x ($x < 2$), обеспечивая формирование покрытия, оптические свойства которого приближаются к объемному диоксиду гафния [5].

Фотографии полученных образцов демонстрируют однородную, гладкую поверхность без видимых дефектов или отслоений. Все пленки обладают хорошей адгезией к подложке и механической стабильностью. Данные атомно-силовой микроскопии (АСМ), не включенные в данные тезисы, подтверждают низкую шероховатость поверхности ($R_q < 1$ нм), что критически важно для применения в качестве просветляющих покрытий ФПЗС.

Таким образом, изменение мощности разряда в диапазоне 500–800 Вт и соотношения газов $\text{Ar}:\text{O}_2$ от 3:1 до 3:3 позволяет гибко управлять оптическими параметрами пленок HfO_2 , обеспечивая показатели преломления, близкие к теоретическому оптимуму для просветляющих покрытий на кремнии.

Список литературы

1. Wiatrowski A., Obstarczyk A., Mazur M., Kaczmarek D., Wojcieszak D. Characterization of HfO_2 optical coatings deposited by MF magnetron sputtering //Coatings. – 2019. – Т. 9. – №. 2. – С. 106.
2. Bright T. J., Watjen J. I., Zhang Z. M., Muratore M., Voevodin A. A. Optical properties of HfO_2 thin films deposited by magnetron sputtering: From the visible to the far-infrared //Thin Solid Films. – 2012. – Т. 520. – №. 22. – С. 6793-6802.
3. Araiza J. J., Alvarez-Fraga L., Gago R., Sanchez O. Surface morphology and optical properties of hafnium oxide thin films produced by magnetron sputtering //Materials. – 2023. – Т. 16. – №. 15. – С. 5331.
4. Berg S., Nyberg T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes //Thin solid films. – 2005. – Т. 476. – №. 2. – С. 215-230.
5. Arun N., Neethish M. M., Ravi Kanth Kumar V. V., Nageswara Rao S. V. S., Pathak A. P. Resistive switching properties of hafnium oxide thin-films sputtered at different oxygen partial pressures //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2024. – Т. 35. – №. 3. – С. 235.

ДЕНДРИТНЫЕ СТРУКТУРЫ В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ НАНОАРХИТЕКТониКИ

ШМАТОК Е. В.¹, МУРАТОВА Е. Н.¹, МОШНИКОВ В. А.¹, ВРУБЛЕВСКИЙ И. А.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается современное состояние исследований в области дендритных структур для ключевых объектов наноархитектоники. Показано, что дендритные структуры на основе металлов (золота, серебра, меди), находящие широкое применение в плазмонике, оптоэлектронике и технологиях накопления энергии, позволяют получать новые синергетические эффекты в элементах

наноархитектоники (в контактах с новыми наноматериалами). Представлены патентные исследования основных тенденций развития технологий получения дендритных структур. Показано, что для науки будущего открываются новые возможности для создания оригинальных технических решений с использованием приемов электрохимии

Ключевые слова: дендритные структуры, наноархитектоника, электрокристаллизация, медные покрытия, плазмоника, токосъемники, литий-ионные батареи, патентные исследования, фрактальные структуры, электроосаждение

В современном материаловедении и микроэлектронике постоянно появляются новые материалы. Однако ключевое отличие текущего этапа от предшествующих нанотехнологических подходов заключается в смещении фокуса в сторону наноархитектоники — области, где ключевую роль играет атомно-молекулярный инжиниринг интерфейсов нанообъектов и сборка наноблочных конструкций.

Поэтому для науки будущего наибольший интерес представляют не только материалы, над которыми ученые работают в данный момент, но и те материалы, которые будут прорывными в будущего. Таким материалам с дендритной наноструктурой и особенностям их образования уделяется внимание данной работе.

В [1,2] были рассмотрены основные перспективные направления наноархитектоники, связанные с такими новыми материалами как каркасы на основе металлоорганических (MOF), ковалентных органических (COF), цеолитных имидазолатных (ZIF) наноструктур, а также двумерные слоистые материалы, включая максены, и ван-дер-ваальсовы гетероструктуры и гетероструктуры на квазикристаллы [3, 4]

Наряду с этими материалами в современном наноматериаловедении интенсивно исследуются дендритные структуры. Для плазмоники, особенно в сочетании с перечисленными материалами в элементах наноархитектоники. Дендритные структуры, обладающие большой удельной поверхностью, способствуют активации фотокаталитических процессов. Кроме того, согласно обзору патентной и лицензионной литературы, такие структуры находят применение для улучшения функциональных характеристик материалов, в частности для снижения ползучести в газотурбинных лопатках за счет контролируемого направления границ раздела [5].

Помимо плазмонных применений, дендритная форма вызывает большой интерес для совершенствования способов формирования теплообменной поверхности с комбинированным пористым покрытием [6-10] и в микроэлектронике, в частности при создании структур типа металл–диэлектрик–металл (МДМ), металл–полупроводник–металл (МПМ) и металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Такие структуры активно развиваются в современной оптоэлектронике, и в ряде работ в качестве одного из металлических электродов предлагается использовать дендрит [11]. Кроме того, значительный интерес представляет анализ процессов на интерфейсе формирование фрактальных дендритных структур на больших площадях [12-15].

В теоретическом плане традиционно считается, что образование дендритов, как и расщепленных кристаллов, происходит в неоднородных растворах. В последнее время развивается новое представление, согласно которому источники неоднородности могут быть связаны не только с наличием примесных атомов, но и с образованием газовых пузырьков в процессе роста.

Отдельно следует обозначить области, в которых дендритные структуры пока не нашли должного технического применения, но являются чрезвычайно перспективными и привлекают пристальное внимание исследователей. К числу таких направлений относятся элементы наноархитектоники, где одним из ключевых нанообъектов выступает фрактал.

Применение дендритных структур в этой области открывает новые возможности для создания сложноорганизованных интерфейсов и атомно-молекулярного дизайна.

Активное развитие исследований дендритных структур подтверждается и анализом патентного ландшафта. Согласно проведенному патентному исследованию, технологии получения дендритных покрытий металлов методом электроосаждения известны и активно развиваются, причем наибольшая активность в этой области наблюдается в Китае, что коррелирует с глобальными трендами развития технологий производства литий-ионных батарей.

Среди зарубежных патентных документов особый интерес представляют GB2185757A [16] и US20170016131A1 [17], которые напрямую описывают методы обработки и роста дендритных кристаллических структур на металлических слоях, включая аспекты, связанные с электрофизическими свойствами (тепло- и электропередачу). Патенты CN113620334A [18] и CN103880059A [19], в свою очередь, раскрывают способы получения дендритных структур на основе оксида меди, который может выступать предшественником или компонентом при производстве электродов. Эти документы демонстрируют общность подхода к получению дендритов различных металлов, включая медь, и представляют ценность для понимания смежных технологий.

В то же время российское патентование в данной узкой области представлено слабо и в основном касается общих гальванических процессов или иных областей применения (например, теплообменных покрытий), что подтверждает актуальность проведения собственных исследований и разработок в РФ.

Таким образом, дендритные структуры, особенно на основе меди, находятся на пересечении нескольких актуальных направлений современного материаловедения: плазмоники, оптоэлектроники, наноархитектоники и, технологий накопления энергии. Отсутствие прямых патентных аналогов в узкой области применения дендритных покрытий открывает перспективы для дальнейших исследований и разработки оригинальных технических решений, сочетающих преимущества высокой площади поверхности, иерархической пористости и улучшенных транспортных свойств, характерных для дендритных структур, формируемых при высоких плотностях тока.

В технологическом плане следует отметить новое направление с использованием глубоких эвтектических растворителей [20]. Уже разработаны способы получения меди из глубоких эвтектических растворителей под действием лазерного излучения на непланарные стеклянные поверхности

Заключение

Дендритные структуры представляют собой один из наиболее перспективных объектов современного материаловедения, имеющих интерес для таких актуальных направлений, как наноархитектоника, плазмоника, оптоэлектроника и технологии накопления энергии. Уникальные свойства дендритных наноструктур — высокая удельная поверхность, иерархическая пористость, структурная гибкость и возможность управления морфологией в процессе электрокристаллизации — обуславливают широкий спектр потенциальных применений.

Таким образом, дальнейшие исследования в области формирования и характеристики медных дендритных структур, а также изучение их функциональных свойств применительно к электрохимическим устройствам накопления энергии представляются перспективными и могут внести существенный вклад в развитие отечественной научно-технической базы в данной области.

Список литературы

1. Налимова С.С., Мошников В.А. Новые материалы на этапе перехода от нанотехнологии к наноархитектонике // ННБ XIII, Санкт-Петербург, 15 – 16(17) мая 2025
2. Козодаев Д.А., Муратова Е.Н., Мошников В.А. От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 350-352
3. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Мошников В.А., Соломонов А.В. Модульный дизайн интерфейсов в наноструктурах из квазикристаллических блоков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28. № 2. С. 80-93.
4. Кононова И.Е., Мошников В.А., Кононов П.В. Моделирование трехмерных пористых иерархических материалов, организованных посредством самосборки наносфер // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 54-63
5. Берестевич А.И. Повышение эксплуатационных свойств рабочих лопаток ГТУ на основе управления процессом формирования их структуры автореферат к.т.н Рыбинск:Рыбинский гос.авиационный ун-т им П.А.Соловьева, 2023
6. Патент RU 2 806 750 C2 от 07.11.2023. «Способ формирования теплообменной поверхности с комбинированным пористым покрытием и теплообменная поверхность, полученная таким способом»
7. Патент RU 111 538 U1 от 20.12.2011.»Устройство для формирования антикоррозионного покрытия на поверхностях теплообменного оборудования»
8. Патент SU 1 592 411 A1 от 15.09.1990 «Способ управления процессом гальванопокрытия»
9. Патент RU 2 516 407 C2 от 20.05.2014 «Покрытие из дендритного полиуретана»
10. 20170016131 A1 A method for growing a dendritic crystal structure that provides targeted heat transfer
11. Лебедев Д.В. автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Институт аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН). Санкт-Петербург, 2026
12. Козодаев Д.А., Новиков И.А., Мошников В.А. О возможности диагностики процессов на интерфейсах слоев структур с использованием эффекта внутреннего трения // В сборнике: Аморфные и квазикристаллические полупроводники. сборник трудов Международной конференции . Москва, 2025. С. 94-95
13. Рябко А.А., Мазинг Д.С., Бобков А.А., Максимов А.И., Левицкий В.С., Лазнева Э.Ф., Комолов А.С., Мошников В.А., Теруков Е.И. Эффект интерфейсного легирования системы наностержней оксида цинка // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. № 11. С. 1681-1689
14. Tadtayev P.O., Bobkov A.A., Borodzyulya V.F., Lamkin I.A., Mihailov I.I., Moshnikov V.A., Permyakov N.V., Solomonov A.V., Sudar N.T., Tarasov S.A. Thin-film fractal nanostructures formed by electrical breakdown // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Т. 929. С. 012048.
15. Тарасов С.А., Бобков А.А., Бородзюля В.Ф., Ламкин И.А., Михайлов И.А., Мошников В.А., Пермяков Н.В., Соломонов А.В., Сударь Н.Т. Формирование тонкопленочных фрактальных микро- и наноструктур методом электрического разряда // В сборнике: Наука и образование: технология успеха. Сборник докладов международной научной конференции. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). 2016. С. 84-92.
16. Патент GB2185757A от 27.01.2016 «Dendritic surface treatment of metal layers»
17. Патент CN103880059A от 09.03.2016 «Preparation method of dendritic silver nanocrystalline coating using electrodeposition»
18. Патент CN113620334A от 09.11.2021 «Dendritic ordered mesoporous copper oxide nano material, and preparation method and application thereof»
19. Патент US20170016131A1 от 19.01.2017. «A method for growing a dendritic crystal structure that provides targeted heat transfer»
20. Левшакова А.С. Глубокие эвтектические растворители как среда для лазерного синтеза. функциональных материалов Автореферат к.х.н. СПб:СПбГУ, 2024

ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА» - И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПАРТНЕР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» В ОБЛАСТИ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА НАНОАРХИТЕКТониКИ

Козодаев Д.А.¹, Мошников В. А.², Муратова Е. Н.², Яковлева А.А.¹

¹ООО «Активная фотоника», ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Представлены результаты разработок ООО «Активная фотоника» на этапе развития от нанотехнологии к наноархитектонике и особенности взаимодействия с Центром сканирующей зондовой микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Ключевые слова: Атомно-молекулярный дизайн, наноархитектоника, сканирующая зондовая микроскопия

Наука настоящего и будущего в области наноматериалов характеризуется переходом от нанотехнологии к наноархитектонике. Сотрудничество Группы компаний НТ-МДТ, включая ООО «Активная фотоника», с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» тесно связано с решением актуальных задач в наноматериаловедении [1].

ООО «Активная фотоника» — признанный лидер в области передовых технологий отечественного приборостроения для наноанализа. Среди новых разработок ООО «Активная фотоника», пользующихся большим интересом у представителей промышленности и ведущих научных организаций, выделим инспекционную машину uVISION 300. Это современный специализированный инструмент для автоматизированного поиска, индентификации и квалификации дефектов на печатных платах и других изделиях микроэлектронной промышленности методами оптической инспекции. uVISION 300 работает в режимах светлого и темного полей, с освещением и регистрацией как в белом видимом свете (9 полноцветных, либо в выбранной цветовой полосе освещения), так и в УФ освещении (монохромных). Более полную информацию можно получить на сайте [2].

Также на сайте компании можно узнать о возможностях других установок, например 3D CD AFM pSTEP 300. Эта установка атомно-силовой микроскопии для измерения критических размеров двумерных и трехмерных структур сложного профиля неразрушающими методами с высоким разрешением востребована для решения задач метрологии и инспекции в полупроводниковой промышленности.

Репутация чрезвычайно нужного прибора для физико-химического анализа закрепились за рамановским и фотолюминесцентным конфокальным микроспектрометром LS RamBo 620. Подробности технических характеристик заинтересованные лица могут узнать на сайте [2]. Здесь же мы отметим, что режимы конфокальной Рамановской, флуоресцентной и Рэлееской визуализации работают одновременно с атомно-силовым микроскопом.

Наконец, в микроэлектронной и радиоэлектронной промышленности вызывает большой интерес новая разработка — Высокоточный XY позиционер uTRACK 300, как узел фиксации и перемещения полупроводниковых пластин, фотошаблонов, микроэлектронных сборок в составе заводских установок, решающих различные задачи промышленной метрологии, инспекции, литографии.

Эксплуатация и, тем более, разработка новых приборных решений постоянно требует повышение уровня подготовки кадров. Для этих целей ООО «Активная фотоника» организовала, обеспечила оборудованием и финансирует работу молодежного коллектива СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Также подобные Центры созданы в МИЭТе и в ИТМО. Сотрудники (молодые ученые, аспиранты и магистранты) периодически повышают квалификацию, осваивая новые приборы, и в свою очередь обучают практическим навыкам стажеров с предприятий, закупивших оборудование, выступают с докладами и демонстрацией возможностей аналитики на конференциях разного ранга.

Составляющей постоянного роста научной квалификации сотрудников Центра также является участие в семинарах, на которых регулярно выступают приглашенные ведущие специалисты РФ (При этом видео записи этих докладов доступны в интернете). С 2024г.

компания стала выпускать специальные сборники «От нанотехнологии к nanoархитектонике».

В целом в исследования на принципиально более высоком уровне вовлекаются и преподаватели УНЛ «Наноматериалы» (научно-педагогической школы «Атомно-молекулярный дизайн и nanoархитектоника»). Это повышает эффективность патентно-лицензионной работы и публикациях в высокорейтинговых журналах.

Список литературы

1. Козодаев Д.А., Мошников В.А., Муратова Е.Н. и др. Объединенный центр сканирующей зондовой микроскопии ООО "НОВА СПб" - СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в области радиоэлектроники - центр нового типа для решения приоритетных задач // Инновации. 2024. № 1 (297). С. 10-18
2. сайт ООО «Активная фотоника» <https://active-photon.com>
3. От нанотехнологии к nanoархитектонике / Под ред. Козодаева Д.А. Выпуск 1. Уфа: Аэтерна, 2024.
4. От нанотехнологии к nanoархитектонике / Под ред. Козодаева Д.А. Выпуск 2. Уфа: Аэтерна, 2025
5. Козодаев Д.А., Новиков И.А., Костромин С.В. Источник внешнего магнитного поля для магнитно-силовой микроскопии // Патент на изобретение RU 2833421 C1, 21.01.2025. Заявка № 2024111385 от 25.04.2024.
6. Козодаев Д.А., Новиков И.А., Кимель А.В., Хусьянов Д.И., Ступакевич А. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с магнитооптическим микроскопом, для исследования магнитных материалов с перпендикулярной магнитной анизотропией // Патент на изобретение RU 2849975 C1, 01.11.2025. Заявка № 2024122188 от 05.08.2024
7. Козодаев Д.А. UVISION //Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025697178, 23.12.2025. Заявка № 2025695944 от 12.12.2025.
8. Kozodaev D.A., Novikov I.A., Kostromin S.V., Trusov M.A., Moshnikov V.A. External magnetic field source for nanoscale research // В книге: The 22nd International Conference on Magnetism. Book of Abstracts (ICM 2024). Bologna, 2024
9. Козодаев Д.А., Яковлева А.А., Бобков А.А. и др.Способ изготовления проводящего покрытия на поверхности зонда для атомно-силовой микроскопии // Патент на изобретение RU 2825297 C1, 23.08.2024. Заявка № 2023129274 от 13.11.2023
10. Козодаев Д.А., Яковлева А.А., Новиков И.А. и др. Зонд для магнитно-силовой микроскопии // Патент на изобретение RU 2818681 C1, 03.05.2024. Заявка № 2023129275 от 13.11.2023
11. Мадисон А.Е., Козодаев Д.А., Казанков А.Н. и др. Аперриодическая дифракционная решетка, основанная на связи между простыми числами и нулями дзета-функции Римана // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 4. С. 658-663.
12. Е. Н. Муратова, А. Ю. Гагарина, В. П. Безверхний, В. А. Мошников, А. И. Максимов, Д. А. Козодаев, И. А. Врублевский, Н. В. Лушпа, “Формирование транспортных слоев диоксида титана фрактально перколяционной структурой”, Физика твердого тела, 67:12 (2025), 2416–2420
13. Козодаев Д.А., Нестеров С.И., Трусов М.А. и др. Новые научные инструменты для наномасштабных исследований современных материалов и диагностики наноструктур // В книге: Кремний-2024. Тезисы докладов XV Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе. Иркутск, 2024. С. 51.
14. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Kozodaev D.A., et. al. VOC Gas Sensors Based on Zinc Stannate Nanoparticles Decorated with Silver. Nanomaterials 2024, 14, 1993
15. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Maximov, A.I.; Bessonov, V.B.; Parfenovich, S.E.; Tuchkovsky, A.K.; Kozodaev, D.A. Charge Carrier Transport and Localized States in Graphite-like Amorphous Carbon Films at Room Temperatures. Materials 2025, 18, 3977. doi: 10.3390/ma18173977
16. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Maximov, A.I.; Ryabko, A.A.; Gagarina, A.Y.; Kozodaev, D.A. Electrical Properties and Charge Transfer Mechanisms in Nanoscale Anodic TiO2 Films at Low Applied Voltages. Inorganics 2026, 14, 29. doi: 10.3390/inorganics14010029
17. Khalugarova, K.; Spivak, Y.M.; Kozodaev, D.A.; Moshnikov, V.A.; Dombrovskaya, A.A.; Khrapova, E.K. Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles with High Specific Surface Area by Green Synthesis. Micromachines 2026, 17, 156. doi: 10.3390/mi17020156

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ФИС

НАЗАРОВ А.Н., ЕЛАНСКАЯ К.Г., АГАФОНОВА Д.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Спектральные свойства и температурный отклик кольцевого резонатора на основе двумерного фотонного кристалла были исследованы методами компьютерного моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics. Оптимизация структуры позволила значительно улучшить сенсорные характеристики. Итоговая структура может использоваться для измерения температуры фотонных интегральных схем или в качестве самостоятельного интегрального оптического сенсора.

Ключевые слова: фотонный кристалл, резонатор, дефект, температурная чувствительность, добротность.

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой периодические оптические структуры, в которых периодически изменяется показатель преломления. Различают одномерные (1D), двумерные (2D) и трёхмерные (3D) фотонные кристаллы. Показатель преломления в них изменяется в одном, двух и трёх направлениях соответственно. Главная особенность фотонных кристаллов – возможность существования фотонной запрещённой зоны (ФЗЗ). Фотонная запрещённая зона образуется за счёт брэгговского отражения от структуры с периодической неоднородностью показателя преломления. В фотонной запрещённой зоне невозможно распространение излучения в направлениях периодического изменения показателя преломления (n) [1]. Таким образом, в 1D и 2D фотонных кристаллах фотонная запрещённая зона является ограниченной, так как она формируется не во всех направлениях, а в 3D фотонных кристаллах ФЗЗ полная – подавление распространения света происходит по всем направлениям [1,2]. Благодаря этим свойствам устройства на основе ФК могут эффективно применяться в качестве датчиков температуры [3, 4], показателя преломления [5], концентрации [6], оптических логических элементов [7,8], просветляющих [9] или отражающих покрытий [10].

Двумерные фотонные кристаллы представляют интерес за счёт возможности создания в них различных дефектов [11]. Такие дефекты позволяют локализовать излучение в своих пределах, что можно использовать для создания волноводов и резонаторов [11,12], работающих в требуемом диапазоне длин волн.

Моделирование структуры и её оптимизация

Расчёт параметров и оптимизация структуры выполнялись в программной среде COMSOL Multiphysics. Предварительно был выполнен расчёт зонной структуры бесконечного фотонного кристалла. Фотонный кристалл представляет из себя кремниевую подложку с находящимися на ней кремниевыми стержнями в воздушной среде. Симметрия ФК – кубическая. Моделирование проводилось для выбора оптимальных начальных параметров структуры. На рисунке 1 представлен диапазон второй фотонной запрещённой зоны ФК.

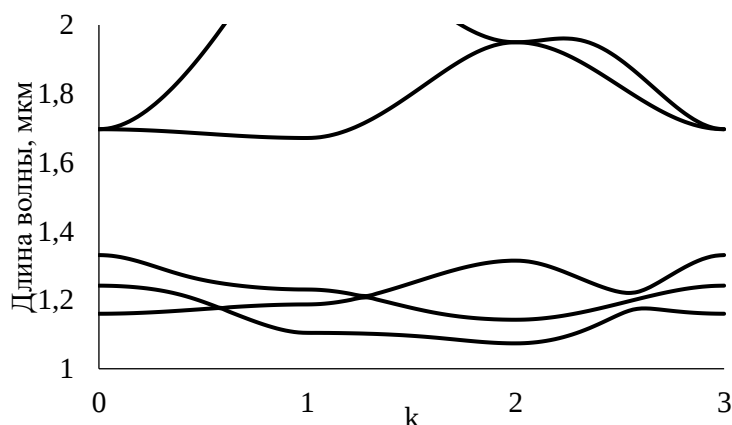


Рис. 1. Диапазон второй фотонной запрещённой зоны

Зная целевой диапазон фотонной запрещённой зоны, можно точнее подобрать параметры a (период элементарной ячейки) и ff (заполненность этой элементарной ячейки). Эти параметры используются для моделирования структуры датчика, показанной на рисунке 2. В качестве начальных параметров были взяты $a = 0,68$ мкм, $ff = 0,3$. При таких параметрах рабочая длина волны будет лежать в диапазоне 1,5 мкм – 1,6 мкм.

Как видно из рисунка 2, основная часть излучения сосредоточена в резонаторе. Увеличение амплитуды напряжённости E поля в резонаторе по сравнению со средней напряжённостью поля в волноводе составило 14 раз. По результатам моделирования были получены следующие характеристики ФК резонатора:

- 1) Резонансная длина волны – 1,5251 мкм;
- 2) Максимальный уровень пропускания – 92,2%;
- 3) Добротность по методу FWHM при температуре 20°C – 9530;
- 4) Температурная чувствительность – 0,05 нм/°C.

С целью улучшения чувствительных характеристик ФК резонатора была проведена оптимизация параметра ff фотонного кристалла. Максимальное значение параметра достигло 0,325. Дальнейшее увеличение нецелесообразно, так как расстояние между отдельными стержнями между резонаторами становятся сильно малы, что существенно усложняет создание такой структуры.

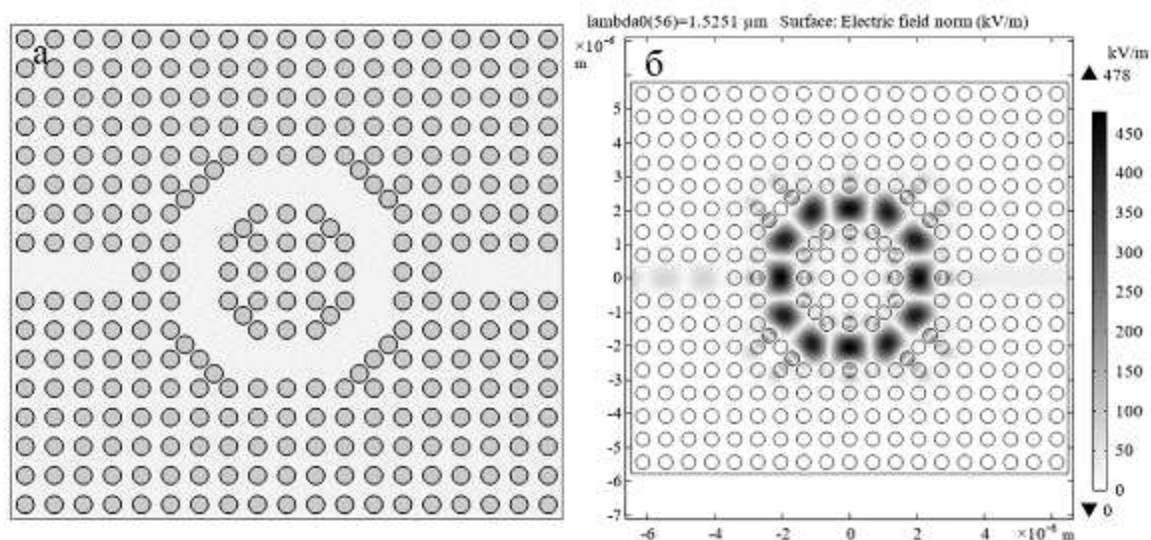


Рис. 2. Вид структуры (а) и распределение модуля z компоненты поля на резонансной длине волны (б)

Результаты оптимизации представлены в таблице 1, где $\lambda_{\max}$ – длина волны, на которой наблюдается максимум пропускания у структуры, T – уровень пропускания структуры на резонансной длине волны, Q – добротность резонансного пика по методу FWHM, S – температурный сдвиг пика пропускания.

Таблица 1

Результаты оптимизации

ff	$\lambda_{\max}$	$T, \%$	Q , отн. ед.	S , нм/°C
0,3	1,52514	92,2	9532	0,054
0,305	1,53138	92,4	9281	0,051
0,301	1,53728	92,6	9043	0,05
0,315	1,54752	92,6	8231	0,058
0,3175	1,5461	92,7	8403	0,0508
0,319	1,54807	92,6	8796	0,056
0,32	1,5495	92,5	9391	0,063
0,325	1,55179	92,3	12219	0,059

Как видно из таблицы 1, наиболее высокую чувствительность структура показывает при значении $ff = 0,32$. Также при таких параметрах сохраняется высокая добротность. Наибольшей добротности структура достигает при $ff = 0,325$.

Заключение

Двумерные фотонные кристаллы благодаря своим свойствам демонстрируют широкие возможности для применения в различных устройствах. Полученные спектральные характеристики и величина температурной чувствительности позволяют использовать резонатор как температурный датчик в составе сложных интегральных схем или оптический фильтр. Методами численного моделирования установлено, что изменение геометрических характеристик приводит не только к сдвигу полосы пропускания, но и к изменению ширины спектральной линии и чувствительности. Данные, представленные в таблице 1 демонстрируют, что даже малое изменение параметра ff может значительно повлиять на сенсорные свойства всей структуры.

Исследование показало целесообразность проведения оптимизации для улучшения параметров фотоннокристаллического резонатора без необходимости менять конфигурацию резонатора и материалов структуры.

Список литературы

1. Q. Gong. Photonic crystals: principles and applications. CRC press, 2014. 354 P.
2. J. D. Joannopoulos. Photonic crystals // Solid State Communications. 1997, T. 102. № 2-3. P. 165 – 173.
3. Analysis of a photonic crystal temperature sensor based on Z-shaped ring resonator / A. Benmerkhi, A. Bounouioua, M. Bouchemat, T. Bouchemat. // Optical and Quantum Electronics. 2021, T. 53. №. 1.
4. A. Hocini. Modeling and analysis of the temperature sensitivity in two-dimensional photonic crystal microcavity // Journal of Nanophotonics. 2016, T. 10. №. 1. P. 16007.
5. A. H. A. Nohoji. Highly sensitive refractive index sensor based on photonic crystal ring resonators nested in a Mach-Zehnder interferometer // Optical and Quantum Electronics. 2022, T. 54. №. 9. P. 574.
6. Encoding complex wettability patterns in chemically functionalized 3D photonic crystals / I. B. Burgess, L. Misschenko, B. D. Hatton, M. Kolle et al. // Journal of the American Chemical Society. 2011, T. 133. №. 32. P. 12430 – 12432.
7. Salmanpour A. Photonic crystal logic gates: an overview // Optical and Quantum Electronics. 2015, T. 47. №. 7. P. 2249–2275.
8. Kumar S. Integrable all-optical NOT gate using nonlinear photonic crystal MZI for photonic integrated circuit. // Journal of the Optical Society of America B. 2020, T. 37. №. 2. P. 359–369.
9. О. А. Голованов. Исследование коэффициента пропускания оптических фильтров на основе многослойных диэлектрических покрытий и фотонных кристаллов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012, вып. № 1 (21). С. 160–170.

10. Анализ спектров пропускания распределенных брэгговских отражателей в зависимости от параметров четвертьволновых слоев / Д. А. Пашкеев, А. М. Усова, Д. В. Ильинов, А.В. Никонов и др. // Прикладная физика. 2018, вып. №. 6. С. 90–97.
11. Design and fabrication of silicon photonic crystal optical waveguides / M. Loncar, T. Doll, J. Vuckovic, A. Scherer // Journal of lightwave technology. 2000, T. 18. №. 10. P. 1402.
12. Mandal S. Nanomanipulation using silicon photonic crystal resonators // Nano letters. 2010, T. 10. №. 1. P. 99 – 104.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

НАЙМАРК А.А., ПОПОВ Е.С., БУЙ К.Д.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования фотокаталитических свойств $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в реакции разложения роданина Ж. Рассмотрены спектры поглощения водного роданина Ж при введении катализатора $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и воздействии ультрафиолетового излучения. На основе полученных данных сделаны выводы об эффективности использования $g\text{-C}_3\text{N}_4$ для очистки воды от вредных веществ.

Ключевые слова: $g\text{-C}_3\text{N}_4$, фотокатализ, роданин Ж, спектр поглощения.

Введение

Графитоподобный нитрид углерода $g\text{-C}_3\text{N}_4$ – это перспективный безметаллический полимерный фотокатализатор, который активно используется для преобразования солнечной энергии, очистки воды и других экологических задач, благодаря простоте синтеза, высокой химической и термической стабильности и нетоксичности [1].

Родамин Ж ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$) – это синтетический органический краситель ярко-красного или фиолетового цвета, обладающий интенсивной флуоресценцией. В присутствии фотокатализаторов он разрушается под воздействием УФ-излучения с образованием промежуточных продуктов, а затем полностью минерализуется до CO_2 , H_2O и других неорганических веществ.

Фотокатализ определяют как изменение скорости или инициацию химических реакций под действием света в присутствии веществ (фотокатализаторов), которые поглощают кванты света и участвуют в химических превращениях участников реакции, многократно вступая с ними в промежуточные взаимодействия и восстанавливая свой химический состав после каждого цикла таких взаимодействий.

Фотокаталитическая деградация – это экологически чистый метод разложения органических загрязнителей (красителей, фармацевтических препаратов, ПАВ) до безвредных веществ (CO_2 , H_2O) под действием света и фотокатализатора. Процесс основан на генерации активных радикалов ($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$) на поверхности полупроводников при облучении УФ или видимым светом [2].

Вне зависимости от способа инициации процесса гетерогенный катализ включает в себя 5 основных стадий (рис. 1): транспорт реагирующих веществ к поверхности катализатора; адсорбция реагирующих молекул поверхностью катализатора; химическая реакция на поверхности катализатора; десорбция продуктов с поверхности катализатора; диффузия продуктов реакции от поверхности катализатора [3-8].

Химическая реакция на поверхности катализатора происходит следующим образом: поглощение фотона материалом; возникновение электронно-дырочных пар, которые в

дальнейшем разделяются на фотоэлектрон и положительно заряженную электронную вакансию и мигрируют к поверхности фотокатализатора; реакции с переносом электрона, приводящие к образованию интермедиатов (радикалов, ионов).



Рис. 1. Стадии каталитического процесса

Спектры поглощения

Для проведения эксперимента был подготовлен раствор родамина Ж в дистиллированной воде. После перемешивания с помощью магнитной мешалки в течение 10 минут был измерен спектр поглощения. Далее добавлен катализатор g-C₃N₄, проведено перемешивание и измерение спектра поглощения. Затем раствор освещали УФ лампой, через равные промежутки времени отбирали пробы, центрифугировали и измеряли спектр поглощения. Спектры поглощения представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что при продолжительном воздействии ультрафиолета пик поглощения снижается. Пик поглощения приходится на длину волны примерно 525 нм, что соответствует теоретическому пику поглощения родамина Ж. Вторичный пик на длине волны около 500 нм связан с образованием димеров.

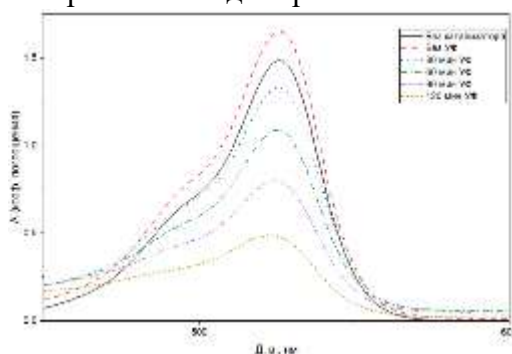


Рис. 2. Спектры поглощения раствора родамина Ж на разных этапах фотокаталитической деградации

Результаты исследования

Эффективность фотокаталитической деградации была рассчитана как отношение текущего максимума коэффициента поглощения к начальному (до облучения). График зависимости эффективности от времени облучения представлен на рисунке 3.

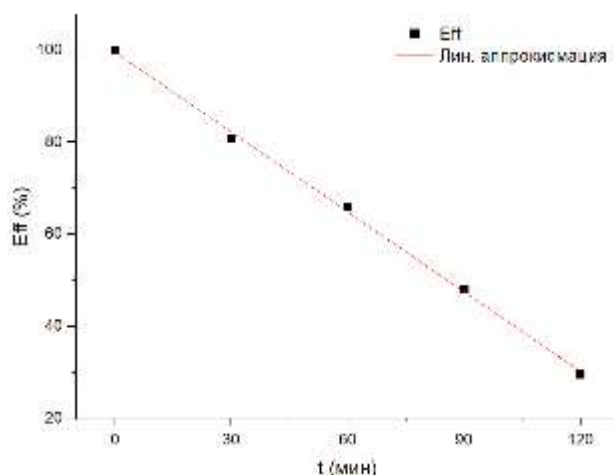


Рис. 3. Эффективность фотокаталитической деградации родамина Ж

Из графика видно, что поглощение уменьшается с увеличением времени воздействия УФ. Это происходит, так как на поверхности частиц катализатора под действием излучения происходят реакции разложения родамина до минеральных компонентов, концентрация родамина в растворе падает, что приводит к уменьшению интенсивности поглощения света.

Таким образом, за 2 часа проведения реакции при воздействии ультрафиолета деградировало примерно 70% от изначального количества родамина Ж. Этот результат подчёркивает перспективность использования $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в фотокаталитических реакциях для очистки воды.

Список литературы

1. Буй К.Д., Налимова С.С., Мошников В.А., Нгуен Д.Т., Нгуен В.Т.А. Подходы к синтезу $g\text{-C}_3\text{N}_4$ для межфазного молекулярного дизайна в перовскитных солнечных элементах // Нано- и микросистемная техника. 2024. Т. 26. № 3. С. 136-144.
2. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В. А. Мошникова, А. И. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 220 с.
3. Налимова С.С., Шомахов З.В. Нанокompозиты оксидов металлов с плазмонными наночастицами для фотокатализаторов и газовых сенсоров // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2025. № 17. С. 696-711.
4. Радайкин Д.Г., Мошников В.А. Структуры для фотокатализа на основе ZnO с наночастицами Ag // Конденсированные среды и межфазные границы. 2025. Т. 27. № 2. С. 293-301.
5. Yakushova N.D., Gubich I.A., Pronin I.A., Karmanov A.A., Moshnikov V.A. Transformation of the band structure of nanostructured films ZnO:Al during photocatalysis in ultraviolet radiation // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2025. V. 19. Is. 4. P. 1030-1037.
6. Якушова Н.Д., Карманов А.А., Губич И.А., Ситникова М.Г., Пронин И.А. Исследование влияния температуры финишной термообработки на оптические и фотокаталитические свойства золь-гель пленок диоксида олова // Нано- и микросистемная техника. 2026. Т. 28. № 1. С. 31-39.
7. Pronin I.A., Filippov I.A., Komolov A.S., Dubov E.A., Karmanov A.A., Yakushova N.D., Korotcenkov G. Photocatalytic degradation of paracetamol on ZnO powders: investigating the effect grain size // Vacuum. 2025. V. 238. P. 114340.
8. Pronin I.A., Sigaev A.P., Komolov A.S., Zhizhin E.V., Karmanov A.A., Yakushova N.D., Kyashkin V.M., Nishchev K.N., Sysoev V.V., Goel S., Amreen Kh., K R., Korotcenkov G. Effects of plasma treatment on the surface and photocatalytic properties of nanostructured $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ films // Materials. 2023. V. 16. Is. 14. P. 5030.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ В ДЕТЕКТОРЕ SPD STRAW TRACKER НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

НАРТОВ А.Р.

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

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние параметров считывающей электроники на точность идентификации частиц малых импульсов с помощью трековой системы детектора SPD. Моделирование отклика индивидуального элемента Straw Tracker'a используется для создания параметризации сигналов, регистрируемых при прохождении заряженных частиц разных типов и импульсов через трекер. Предложенная параметризация улучшает точность моделирования возможности детектора в идентификации частиц.

Ключевые слова: Straw Tracker, straw-трубка, идентификация частиц, считывающая электроника.

Введение

Ускорительный комплекс NICA – это мегасайенс-проект, строящийся в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна, Россия). Он разрабатывается для исследований в области физики элементарных частиц. Один из трёх экспериментов на ускорителе NICA является Spin Physics detector (SPD), предназначенный для изучения спиновой физики элементарных частиц [1]. Детектор SPD находится на стадии конструирования. Для проверки концепции детектора и его чувствительности к изучаемым физическим процессам, используется сложный программный пакет SPDroot [2], позволяющий моделировать как сами физические процессы, так и отклик детектора на них.

Одной из основных составляющих детектора SPD является трекинг-система. Назначение трекера – это регистрация заряженных частиц, образовавшихся в результате взаимодействия первичных частиц, определение их координат и измерение импульса. Внутренняя часть трекера позволяет восстановить точку взаимодействия. Внешняя часть, предназначенная для точного измерения импульса частиц, состоит из большого количества слоёв тонкостенных дрейфовых трубок, также называемых straw-трубки. Каждая из них представляет из себя цилиндрический газоразрядный пропорциональный счётчик с анодной проволокой, натянутой вдоль оси цилиндра. Внешний детектор называется Straw Tracker.

При пролёте заряженной частицы через straw-трубку, происходит ионизация газа с образованием свободных электронов, которые под действием электрического поля дрейфуют к анодной проволоке. Вблизи проволоки поле ускоряет электроны так сильно, что запускается лавинное умножение заряда. Благодаря этому, на электродах индуцируется заряд в десятки тысяч раз превосходящий заряд первичной ионизации.

Для измерения локальной координаты прохождения частицы через трубку используется соотношение между расстоянием от трека до анодной проволоки и временем дрейфа первичных электронов. Задержка между пересечением треком трубки и временем появления значимого сигнала соответствует времени дрейфа электронов, находящихся на наименьшем расстоянии между анодом и треком. При низких порогах определения появления сигнала пространственное разрешение трубки может составлять меньше 150 мкм.

Обычно, детекторы, состоящие из straw-трубок, используются исключительно для трекинга, однако в условиях эксперимента SPD было предложено использовать эту систему

и для идентификации заряженных частиц с малыми импульсами. При импульсах меньше 1 ГэВ, ионизационные потери протонов, каонов и пионов существенно различаются. Заряд, индуцированный на электродах дрейфовой трубки, пропорционален ионизационным потерям.

Таким образом, одновременно измеряя время прихода сигнала и его заряд можно решить обе задачи. Однако, точное измерение времени возможно при быстро нарастающем фронте сигнала, в то время как для точного измерения полного заряда сигнала необходимо длительное его интегрирование. Это время определяется архитектурой аналоговой части считывающей электроники, а именно временем формирования, или *peaking time*.

Наилучшим решением является использование считывающей электроники, имеющей возможность, как быстрого, так и медленного формирования в каждом канале. Такая электроника для считывания сигнала Straw Tracker'a в настоящее время находится в разработке. В качестве резервного варианта рассматривается система считывания, основанная на уже существующих ASIC (Application Specific Integrated Circuits – интегральная микросхема специального назначения), например, VMM3a [3]. Данный чип имеет только один формирователь на канал, но величина *peaking time* может быть выбрана в диапазоне от 25 нс до 200 нс. Таким образом, можно использовать выбранное компромиссное время формирования или использовать два канала с разными временами формирования на одну трубку.

Данная работа посвящена анализу влияния считывающей электроники в наиболее пессимистичной её конфигурации, подразумевающей использование микросхем типа VMM3 с временем формирования сигнала 25 нс, на точность идентификации частиц.

Методология

Для изучения влияния считывающей электроники на точность идентификации частиц использовалось моделирование отклика straw-трубки в программных пакетах Garfield++ [4] и LTSpice [5]. Garfield++ позволяет моделировать сигнал, индуцированный на аноде трубки при прохождении заряженной частицы через неё. LTSpice эмулирует работу считывающей электроники, используя заданную модель её архитектуры. При моделировании сигнала straw-трубки использовались следующие параметры: диаметр трубки 10 мм, диаметр анодной проволоки 30 мкм, напряжение 1750 В, газовая смесь 70%Ar + 30%CO₂. При эмуляции сигнала считывающей электроники использовались следующие параметры: *peaking time* 25 ns, усиление 3 мВ/фКл, динамический диапазон 1В/усиление=333 фКл.

Моделирование производилось для разных типов частиц и различных импульсов p , нескольких значений расстояния от трека до анода R и для нескольких углов θ между ними. Для каждого фиксированного набора параметров (частица; p ; θ ; R) моделировалось 7000 событий. Каждое событие имело информацию об ионизационной потере энергии частицы dE и соответствующее значение амплитуды сигнала на выходе считывающей электроники amp . Примеры распределения этих величин показаны на рисунке N. Флуктуации ионизационных потерь описываются распределением Ландау и характеризуются наиболее вероятным значением (MPV, most probable value) и шириной распределения σ . На рисунке видно, что относительная ширина σ /MPV имеет большее значение для амплитуды, что отражает влияние считывающей электроники. Рисунок 1 (слева) показывает корреляцию между ионизационными потерями и амплитудами каждого сигнала. На рисунке хорошо заметно, что из-за конечности динамического

диапазоне предусилителя, он уходит в насыщение при больших значениях входного заряда.

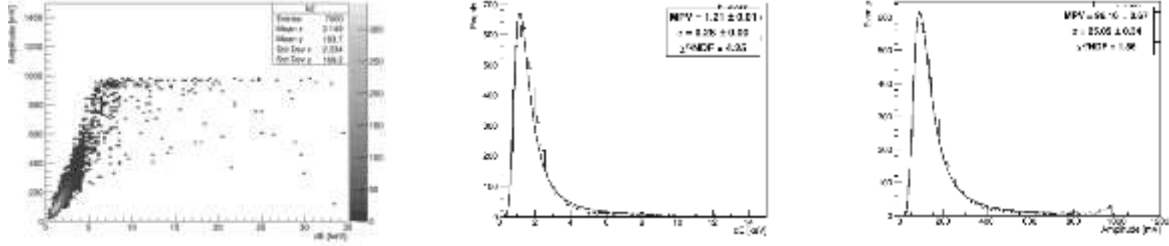


Рис. 1. Распределение параметров dE и amp для пионов с $p=300$ МэВ/с, $\theta=90^\circ$, $R=0.1$ мм: (слева) 2D гистограмма; 1D гистограмма с аппроксимацией по Ландау для dE (в центре) и amp (справа)

Для создания параметризации необходимо учесть зависимость амплитуды сигнала от ионизационных потерь, а также учесть увеличение флуктуаций. Сначала производилась параметризация перехода из значений ионизационных потерь в значения амплитуды. Для этого, для каждого набора параметров рассчитывалось значение отношения amp_{MPV}/dE_{MPV} в зависимости от dE_{MPV}

$$amp/dE = f(dE, R, \theta). \quad (1)$$

Для учёта увеличения флуктуаций амплитуды сигналов по сравнению с ионизационными потерями использовался линейная аппроксимация 2D гистограммы $amp=g(dE)$. Для каждой пары значений amp_i и dE_i , составляющих гистограмму, рассчитывалась величина $residual_i = g(dE_i) - amp_i$. Аппроксимация полученного распределения функцией Гаусса позволяет оценить его ширину для каждого набора данных, характеризующегося dE_{MPV} как $\sigma_{res} = h(dE_{MPV})$.

Полученные результаты используются для улучшения точности предсказания пакета SPDroot. В текущей версии в качестве измеряемой Straw Traker'ом используются непосредственно ионизационные потери заряженной частицы, в то время как в реальном детекторе будет измеряться амплитуда сигнала. Влияние считывающей электроники может быть учтено для каждой straw-трубки путём преобразования dE в амплитуду с учётом выше приведённой параметризации:

$$amp = f(dE, R, \theta) \cdot dE + X, \quad (2)$$

где X – случайная величина, имеющая нормальное распределение с $\mu=0$ и $\sigma = \sigma_{res}(dE, R, \theta)$.

Результаты

На рисунке 2 приведены зависимости отношения amp_{MPV}/dE_{MPV} для различных типов частиц (слева), различных R (в центре) от величины dE_{MPV} . Видно, что значение отношения amp_{MPV}/dE_{MPV} не зависит от типа частицы и угла. Видна зависимость только от R и dE . Поэтому, на основе функции (1) вводится двумерная параметризация вида

$$f(dE, R) = a(R) + A(R) \cdot \exp(b(R) \cdot dE). \quad (3)$$

Справа на рисунке 2 показана зависимость σ_{res} для различных R и θ . Видно, что функция не зависит ни от расстояния до анода, ни от угла. Для неё вводится одномерная параметризация от величины dE .

Была получена параметризация для преобразования ионизационных потерь заряженной частицы в отклик единичной straw-трубки в виде (2). Для проверки были взяты распределения значения dE , полученные в Garfield++, и каждая точка dE_i была преобразованы в соответствии с полученной параметризацией. Сравнение результатов с

откликом, полученным в LTSpice показало, что параметризация обеспечивает высокую точность преобразования (пример на рис. 3).

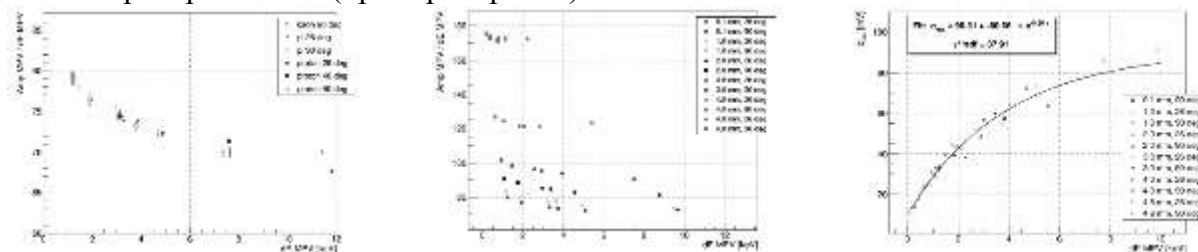


Рис. 2. Преобразование ионизационных потерь в амплитуду: (слева) выполненное с помощью MPV распределения Ландау для dE и амплитуды сигнала для различных частиц $R=0,1$ мм; (в центре) для каонов при различных R ; (справа) зависимость $\sigma_{res}=h(dE_{MPV})$

Для определения возможности различить частицы разных типов в SPDroot были использованы отклики трубок, через которые частица прошла при симуляции. Для уменьшения флуктуации в «хвостах» распределения Ландау, используется 65% сигналов, имеющих наименьшую амплитуду (усечённое среднее). Рисунок 4 показывает значение усечённого среднего для $\theta=40^\circ$, а также, в виде баров, ширины полученных распределений. Видно, что при больших сигналах насыщение электроники оказывает существенное влияние на точность идентификации частиц.

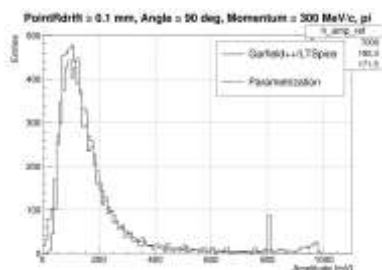


Рис. 3. Сравнение распределений, полученных из одного набора dE , путём обработки в LTSpice и с использованием параметризации (PointRdrift=R)

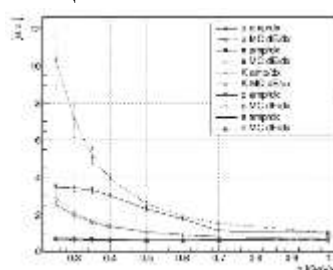


Рис. 4. Зависимость точности идентификации частиц от импульса для $\theta=40^\circ$: пунктирная линия – при использовании ионизационных потерь; сплошная линия – амплитуда, полученная с помощью параметризации

Заключение

Результаты моделирования отклика straw-трубки в программных пакетах Garfield++ и LTSpice для значения peaking time 25 нс были параметризованы как функции от величины ионизационных потерь и расстояния от трека до анода и имплементированы в SPDroot. Результаты, полученные при использовании параметризации, совпадают с откликом, полученным с использованием LTSpice. При моделировании в SPDroot было показано, что на больших сигналах из-за насыщения электроники существенно снижается точность идентификации частиц.

Список литературы

1. Abazov V. M. и др. Conceptual design of the Spin Physics Detector. 1 2021, 2102.00442.
2. spdroot // NICA Detectors Software URL: <https://git.jinr.ru/nica/spdroot/> (Дата обращения: 01.05.2026)
3. Iakovidis G. VMM3a, an ASIC for tracking detectors // J. Phys.: Conf. Ser. 1498 012051
4. Garfield++ // <https://garfieldpp.web.cern.ch/>. Дата обращения: 01.05.2026
5. Gilles Brocard. The LTSpice IV Simulator: Manual, Methods and Applications // Würth Elektronik. - 2013.

МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ЁМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНОГО РАЗВЯЗЫВАЮЩЕГО КОНДЕНСАТОРА

НАУМЕНКО А.О., Поляков Д.А.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)»*

Аннотация. В работе рассмотрены методы характеристики ёмкостных характеристик интегрального развязывающего конденсатора (ИРК). Исследование выполнено на основе схемотехнического моделирования модели реального ИРК, представленной в виде сетки экстракции топологических компонентов R и C. В работе рассмотрены три метода определения эффективной ёмкости. Полученные результаты представлены в виде частотных зависимостей эффективной ёмкости и сопоставлены между собой. Определены преимущества и недостатки каждого из методов, а также выбран метод, наиболее подходящий для определения эффективной ёмкости ИРК.

Ключевые слова: интегральный развязывающий конденсатор, эффективная ёмкость, схемотехническое моделирование.

Введение

Отдельный интегральный развязывающий конденсатор – ёмкостная структура, реализованная на основе МОП-транзистора, добавляемая в кристалл микросхемы и подключаемая к шинам питания и земли вместе с КМОП-логическими элементами. Основная функция ИРК заключается в накоплении и быстрой отдаче заряда в моменты кратковременных импульсов потребляемого тока.

В КМОП цифровых интегральных схемах (ЦИС) токовые всплески возникают при переключении логических элементов. Из-за заметного сопротивления шин питания и земли они вызывают IR-drop эффект – кратковременное падение напряжения питания и повышение потенциала земли. ИРК уменьшает эти эффекты. Шины связи ИРК и КМОП-структур обладают малыми паразитными сопротивлениями и индуктивностями, так как они расположены в непосредственной близости друг к другу. Таким образом, ИРК быстро отдаёт накопленный заряд и повышает устойчивость работы логических элементов.

Целью настоящей работы является сравнение методов определения эффективной ёмкости реального интегрального развязывающего конденсатора на основе схемотехнического моделирования. В качестве объекта исследования рассматривается модель ИРК, представляющая собой сетку экстракции топологических компонентов R и C, которая учитывает ёмкость подзатворного диэлектрика, сопротивления проводящих областей и контактов.

Описание рассматриваемых методов определения эффективной ёмкости ИРК

Для определения ёмкости были рассмотрены три метода. Первый метод основан на анализе переходной характеристики, которая может быть получена при выполнении transient-анализа. При подаче постоянного напряжения от источника питания процесс заряда ёмкостной структуры аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Следовательно, при заданном внешнем сопротивлении ёмкость ИРК может быть определена по одной точке на переходной характеристике, соответствующей выбранному уровню напряжения на конденсаторе, и рассчитана как:

$$C_{\text{эфф}} = -\frac{t}{R \ln(1 - U_c / U_{\text{ист}})}.$$

Второй метод основан на подборе коэффициента пропорциональности для модели ИРК. В данном случае используется импульсный источник напряжения. Сигналы, полученные от источника и ИРК в ходе transient-анализа представляются в виде набора дискретных отсчётов. Для каждого шага во времени определяется разность между входным напряжением и напряжением на ИРК, а также приращение напряжения на ИРК. Данные величины связаны между собой коэффициентом пропорциональности, зависящим от внешнего сопротивления и ёмкости структуры:

$$k = \frac{\Delta U_c}{U_{\text{ист}} - U_c} = \frac{\Delta t}{CR}.$$

Таким образом, после подбора коэффициента пропорциональности эффективная ёмкость ИРК рассчитывается с учётом шага дискретизации – Δt и внешнего сопротивления R :

$$C_{\text{эфф}} = \frac{\Delta t}{kR}.$$

Третий метод основан на частотном анализе комплексного импеданса структуры. В данном случае на модель ИРК подаётся малосигнальное гармоническое воздействие от синусоидального источника напряжения. В результате АС-анализа определяется комплексное сопротивление структуры – $Z(f)$. Поскольку реальный ИРК содержит ёмкостную и резистивную составляющую удобно перейти к комплексной ёмкости, связанной с импедансом следующим выражением:

$$C_{\text{эфф}}(f) = \frac{1}{j2\pi fZ(f)}.$$

Вещественная часть комплексной ёмкости характеризует способность структуры накапливать заряд, т.е. является эффективной ёмкостью ИРК. Мнимая часть комплексной ёмкости определяет потери.

Схемотехническая реализация рассматриваемых методов представлена на рис. 1:

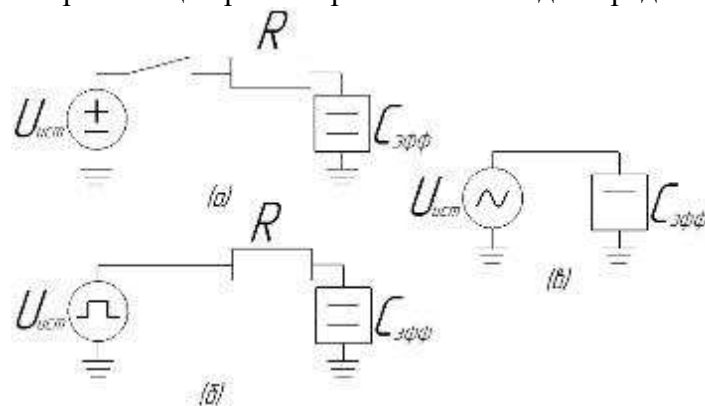


Рис. 1. Схематехническая реализация: (а) – первого метода, (б) – второго метода, (в) – третьего метода.

Результаты

Для последующего сравнения результаты временных методов были приведены к частотному виду посредством ввода характерной частоты. Из переходных характеристик, полученных при различных внешних сопротивлениях, определялась постоянная времени τ , по которой была вычислена и скорректирована с помощью коэффициента пересчёта характерная частота. Коэффициент пересчёта был определён так, чтобы согласовать

частотный масштаб временных методов с результатами АС-анализа. Такой переход позволяет связать длительность переходного процесса с частотным масштабом. В результате данные, полученные тремя методами, были представлены в виде частотных зависимостей эффективной ёмкости ИРК, представленных на рис. 2:

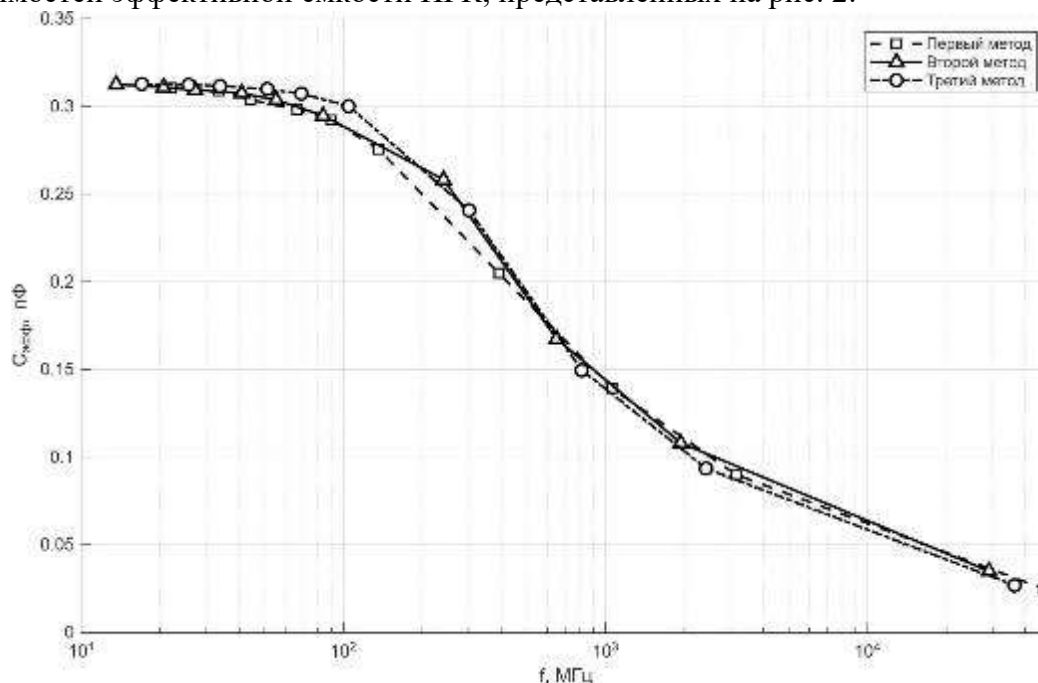


Рис. 2. Сравнение методов определения ёмкости ИРК.

Из рис. 2 видно: все три метода дают близкие результаты и один и тот же характер частотной зависимости эффективной ёмкости ИРК. Наилучшее совпадение результатов наблюдается между вторым и третьим методами. В таблице 1 представлены основные преимущества и недостатки рассмотренных методов.

Таблица 1

Преимущества и недостатки рассматриваемых методов

	Преимущества	Недостатки
Первый метод	Простая реализация; быстрый расчёт; не сложная обработка данных.	Меньшая точность, обусловленная чувствительностью к определению времени заряда и приближенным описанием переходного процесса экспоненциальной зависимостью.
Второй метод	Высокая точность, обусловленная дискретизацией переходной характеристики.	Вычислительная сложность. Необходимость обработки большого массива данных при малом шаге дискретизации.
Третий метод	Высокая точность. Возможность оценить потери.	Вычислительная сложность.

Заключение

Для анализа ИРК наиболее предпочтительным является третий метод, так как он характеризуется высокой точностью и позволяет напрямую определить частотную зависимость эффективной ёмкости. Последний факт важен для ИРК, поскольку в состав ЦИС входит большое количество логических элементов, которые переключаются с различными частотами.

Список литературы

1. Djatmiko W. Capacitance Measurements System Using RC Circuit // KnE Social Sciences. 2019. P. 603–610.
2. Wang X., Shi Q., Liu D., Xie B., Chen S., Luo J., Lu P. Absolute Capacitance Measurement by Direct Digital Fitting of Proportional Coefficient // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, № 8.
3. Itagaki M., Suzuki S., Shitanda L., Watanabe K. Electrochemical Impedance and Complex Capacitance to Interpret Electrochemical Capacitor // Electrochemistry. 2007. P. 649–655.
4. Meng X. Saleh R., Arabi K., Layout of Decoupling Capacitors in IP Blocks for 90-nm CMOS IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2008. Vol. 16, № 11. P. 1581–1588.
5. Popovich M., Friedman E. G., Secareanu R. M., Hartin O. L. Efficient Distributed On-Chip Decoupling Capacitors for Nanoscale ICs // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2008. Vol. 16, № 12. P. 1717–1721.
6. Weste N. H. E., D. M. Harris. CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective // Boston : Addison-Wesley, 2011. P. 840

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА INSb В ПРОЦЕССЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ РЕЗКИ

НЕСТЮРКИН М.С.^{1, 2}, ПОДГОРНЫЙ Д.А.², АБДУРАГИМОВ Б.^{2, 3}

¹АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н. П. Сажина, Москва, Россия, ²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия, ³Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова, Москва, Россия

Аннотация. Проволочная резка монокристаллов является одним из основных этапов для формирования параметров поверхности на пластинах InSb класса «Epi-ready». В данном исследовании изучался вопрос теоретического расчёта характеристики подачи и определения лимитирующих параметров для движения рабочего стола, а также выявление областей напряженности резаной поверхности пластины. Экспериментальная работа проводилась с определением необходимых для сегментирования участков поперечного среза монокристалла InSb, для каждого из которых был проведен расчёт скорости резки. Представлено практическое подтверждение теоретических расчётов с эффективным изменением параметров поверхности.

Ключевые слова: InSb, проволочная резка, пластины «Epi-ready», напряженный поверхностный слой.

Введение

Соединения InSb в настоящее время являются основным материалом для изготовления матричных фотоприёмных устройств [1]. Эти приборы создаются по технологии эпитаксиального роста, что требует высокого качества подложек, на которые впоследствии будут наноситься функциональные структуры. Технология получения МФПУ состоит из множества этапов, одним из которых является механическая обработка монокристаллов, включающая в себя такие этапы, как разделение монокристаллов на пластины, их последующая шлифовка и процессы ХМП [2]. Разделение монокристаллов на пластины происходит посредством проволочной резки. Данный технологический передел во многом определяет качество будущей продукции. Этот факт является причиной, по которой многопроволочная резка требует ёмкого анализа её влияния на качественные характеристики пластин.

Математическая модель

В работе [3] была предложена модель, в которую были внесены поправки с учетом условий резки InSb (100). Так, была рассмотрена модель проволочной резки с учётом сил, воздействующих на кристалл InSb (Рис. 1).

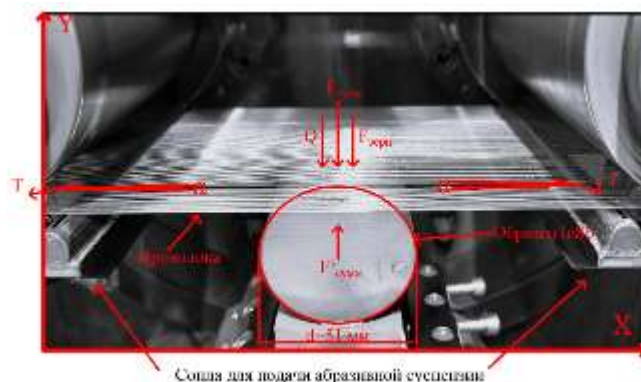


Рис. 1: Силы, воздействующие на монокристалл InSb при проволоочной резке.

В результате математического анализа векторных характеристик получим:

$$F_{\text{зерн}} = \frac{F_{\text{сумм}}}{N} = \frac{2T \sin \alpha}{L_{\text{част}}} \times L'$$

Где **F_{зерн}** - сила, прикладываемая к одному абразивному зерну (Н); **F_{сумм}** – суммарная сила, которую прикладывает проволока к разрезаемому образцу (Н); **N** – количество абразивных частиц (шт); **T** – значение натяжения проволоки (Н); **α** – угол прогиба проволоки (градусы); **L_{част}** – расстояние между абразивными частицами. **L'** – ширина реза монокристалла (общая ширина контакта между проволокой и кристаллом InSb) (мм).

В круглой форме сечения монокристалла InSb ширина реза **L'** не постоянна и изменяется по мере прорезания кристалла, вследствие чего контакт проволоки с разрезаемым объектом также не постоянен. Подаваемый поток суспензии в зону резки имеет постоянное значение, следовательно, в область проволоочной резки попадает постоянное число абразивных частиц, а значит расстояние между абразивными частицами **L_{част}** можно принять за не изменяющуюся величину (const). В таком случае распределение общей силы, действующей на кристалл **F_{сумм}** зависит от ширины реза монокристалла InSb, а именно с увеличением ширины резания объекта уменьшается точечная сила воздействия проволоки на объект (Рис. 2).

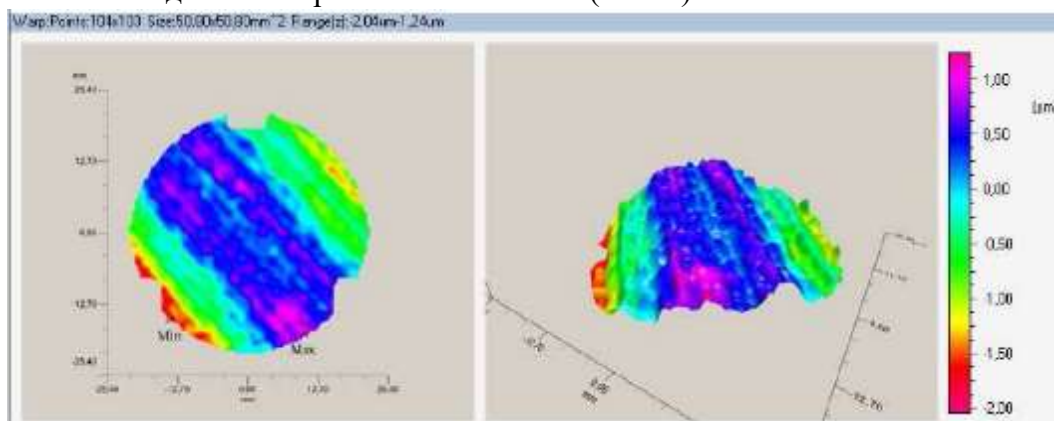


Рис. 2: Картина топографии поверхности образца InSb, полученного в результате резки с постоянной скоростью подачи рабочего стола

На рис. 2 представлена картина топографии поверхности InSb, полученная в результате резки с постоянной скоростью подачи рабочего стола. На картине различимы области геометрической неоднородности поверхности, вызванные неравномерным

распределением силы воздействия проволоки на кристалл вследствие уширения области реза круглого сечения кристалла. Предполагается, что области неоднородности могут быть по-разному напряжены, что проверяется рентгеновским картированием поверхности. Исследование было проведено на основе анализа уширения полученных кривых качания (FWHM) с проходом по диаметру пластины 51 мм, перпендикулярно полосам реза. Направление измерения схематично представлено на рис. 3 (а). Измерение FWHM осуществлялось с шагом съёмки 2,55 мм и представлено в виде графика на рис. 3 (б).

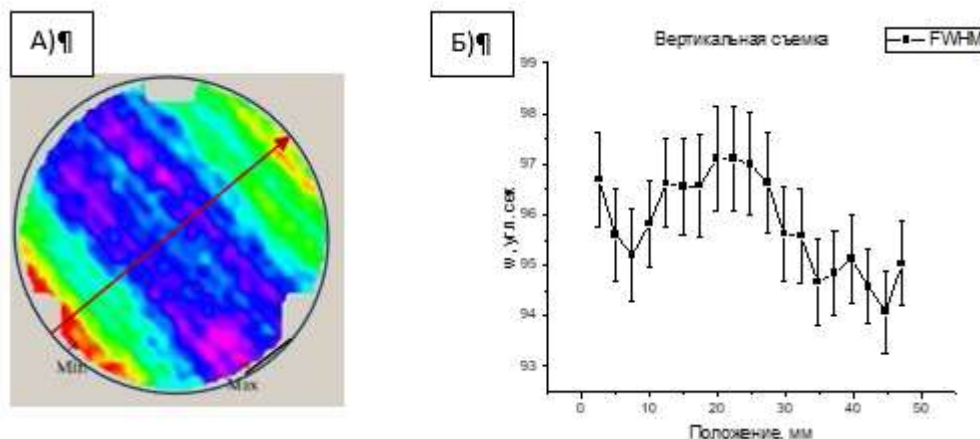


Рисунок 3: Исследование напряженной поверхности резаной пластины InSb
 А) схема направления проведения измерений на поверхности пластины InSb
 Б) график измерения FWHM по поверхности пластины с шагом измерения 2,55 мм.

На рисунке 3 представлена зависимость уширения кривых качания от положения измерения в пространстве поверхности пластины InSb. Так, значения уширения кривых качания изменяются в соответствии с расположением областей неоднородности пластины, что свидетельствует о неравномерности внесенных напряжений после проволоочной резки, а именно увеличении напряженности поверхности пластины InSb к середине пластины, в той области, где ширина реза монокристалла максимальная.

Отсюда возникает необходимость избавления от областей неоднородности. Для этого был проведен процесс проволоочной резки образца InSb диаметром 51 мм с откорректированными расчётными параметрами скорости подачи рабочего стола относительно принятой постоянной скорости резки [4] (скорость подачи рабочего стола) $V_{ст}=8$ мм/ч (рис. 2).

Коррекция заключалась в рассчитанной скорости подачи рабочего стола для каждого блока монокристалла InSb (сегментация поперечного среза монокристалла InSb была проведена с делением его на 20 одинаковых по высоте блоков, с учётом ширины реза для каждого из блоков). (Vбл) Ориентировочная толщина отрезаемой пластины ≈ 1 мм. После резки была проведена съёмка топографии [5] поверхности пластины InSb, полученной с расчётной переменной скоростью резки. (Рис. 4).

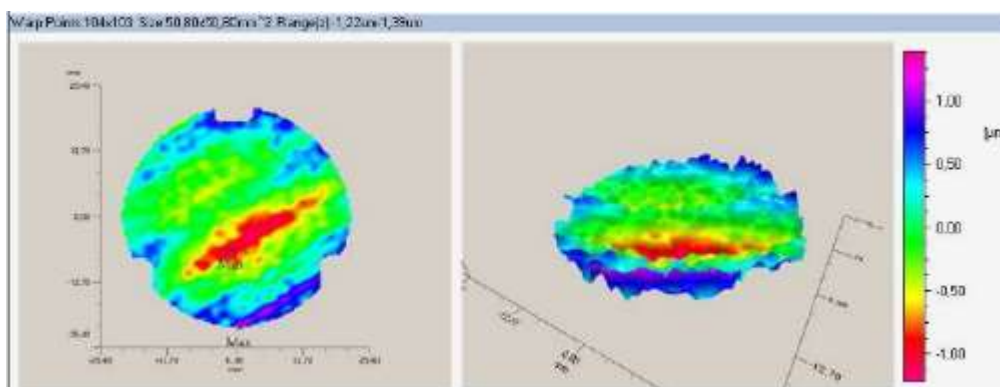


Рисунок 4 – Картина топографии поверхности образцов InSb, полученной в результате резки с переменной расчётной скоростью.

Выводы

Расчёт и изменение характеристики скорости резки приводит к положительной динамике изменения поверхностных характеристик и предполагает проведение дополнительных исследовательских работ для улучшения качества пластин.

Список литературы

1. Udayashankar, N. & Bhat, H.. (2001). Growth and characterization of indium antimonide and gallium antimonide crystals. *Bulletin of Materials Science*. 24. 445-453. 10.1007/BF02706714.
2. Козлов Р.Ю. А.А. Трофимов, Е.В. Молодцова, П.В. Павлов, О.С. Павлова, М.С. Нестюркин, Н.В. Щеников «Разработка промышленно-ориентированной технологии изготовления полированных пластин InSb диаметром до 100 мм». //Материалы XXVII международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения // Акционерное общество "НПО "Орион", 2024, с.204-206, DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-204.
3. Egemen T. «Effect of Process Parameters on Surface Quality for Wire Saw Cutting of Alumina Ceramic», *Gazi University Journal of Science GU J Sci*, 24(2):291-297(2011)
4. Подгорный Д. А., Нестюркин М. С., Н.Ю. Комаровский. Влияние технологических параметров при многопроволочной резке слитков GaAs на поверхностные характеристики пластин. *Известия высших учебных заведений // Материалы электронной техники*, 2023. — № 26 (2). — С. 101–109. — URL: <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>. EDN: PMDJIV.
5. Тихонов Д.А., Нестюркин М.С., Молодцова Е.В., Комаровский Н.Ю., Козлов Р.Ю., Князев С.Н. «Исследование влияния Кристаллографической ориентации пластин InSb на их поверхностные характеристики» // НАНОИНДУСТРИЯ // ISSN: 1993-8578eISSN: 2687-0282, 2025, стр.594-597.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА АВТОЭМИССИОННОГО ТОКА

Нечаев М.С.1, Соков С.А.1, Шигарова А.С.1,2, Ченцова Н.В.1,2, Колосько А.Г.1, Филиппов С.В.1, Попов Е.О.1

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. В работе представлены численные методы расчета вольт-амперных характеристик металлических полевых эмиттеров, основанный на численном расчете интеграла Гамова для различных форм потенциального барьера. Рассмотрены три модели барьера: элементарный (треугольный), Шоттки-Нордгейма и Кирицакиса (с учетом кривизны острия). Показано, что для эмиттеров с малым радиусом кривизны модель Кирицакиса дает ВАХ, заметно отличающиеся от предсказаний стандартных моделей. Вычислительная реализация включает формализм Кембла для прозрачности барьера и численное интегрирование по энергиям. Результаты демонстрируют преимущество предложенного подхода как источника эталонных ВАХ при тестировании аналитических

аппроксимаций. Метод ориентирован на применение в задачах проектирования острийных катодов для устройств вакуумной микроэлектроники.

Ключевые слова: полевая эмиссия электронов, эмиссионный ток, потенциальный барьер, треугольный барьер, барьер Шоттки-Нордгейма

Введение

Полевая эмиссия электронов лежит в основе работы широкого спектра устройств: сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения [1], компактных источников рентгеновского излучения [2], нейтрализаторов заряда для космических аппаратов [3] и ряда других приборов вакуумной микроэлектроники. Начиная с 1928 года теория полевой эмиссии электронов бурно развивалась. Фаулер и Нордгейм первыми предложили рассматривать эмиссию электронов с поверхности материала как квантовомеханическое туннелирование через потенциальный барьер [4]. Разработанная модель имела треугольную форму. Ее профиль описывается как:

$$M(z) = (\varphi - E_n) - e \cdot F \cdot z, \quad (1)$$

где φ – работа выхода [эВ], E_n – нормальная компонента энергии частицы [эВ], e – элементарный заряд, F – напряженность электрического поля [В/нм], z – координата, вдоль которой происходит туннелирование электрона [нм].

Однако модель треугольного барьера не учитывает влияние сил изображения, которые возникают, когда электрон, отрываясь от поверхности материала, индуцирует в нем заряд. Теория Фаулера-Нордгейма также рассматривала модель, учитывавшую силы изображения, действующие на электрон, но она была математически некорректна. В 1956 году, Мерфи и Гуд представили поправку к этой модели [5]. Форма барьера стала иметь закругление в области максимальной потенциальной энергии, и известна как барьер Шоттки-Нордгейма. Он описывается следующей формулой:

$$M(z) = (\varphi - E_n) - e \cdot F \cdot z - \frac{C_{img}}{z}, \quad (2)$$

где C_{img} – константа, описывающая силы изображения [эВ·нм].

Дальнейшее развитие нанотехнологий и появление эмиттеров (источников свободных электронов) с нанометровыми радиусами кривизны остриев (менее 20 нм) привело к предположению об ограниченности уравнения Мерфи-Гуда. Высказана гипотеза, что для таких объектов аппроксимация электростатического потенциала линейной функцией, лежащая в основе первых двух моделей, становится неточной, так как потенциал начинает значительно искривляться в пределах области туннелирования [6].

В работе Кирицакиса [6] предложена усовершенствованная форма потенциального барьера. Добавлен квадратичный член, зависящий от локальной кривизны поверхности эмиттера:

$$M(z) = (\varphi - E_n) - e \cdot F \cdot z - \frac{C_{img}}{z + \frac{z^2}{2 \cdot r}} + e \cdot F \cdot \frac{z^2}{r}. \quad (3)$$

где r – радиус закругления острия [нм].

Таким образом, развитие теоретических моделей барьеров привело к созданию практических инструментов для их расчета и проектирования, что делает особенно актуальным корректное описание формы потенциального барьера как фундаментального принципа для предсказания эмиссионных характеристик.

Аналитические приближения и переход к численному расчету

Для практического описания вольт-амперных характеристик (ВАХ) полевых эмиттеров исторически был разработан ряд аналитических формул. Точность этих формул варьируется, однако их общим преимуществом является простота и высокая скорость вычислений.

Уравнение Мерфи-Гуда с аппроксимацией Форбса-Дина:

$$J_k = a_{FN} \varphi^{-1} \exp(\eta) F_R^2 f^{2-\eta/6} \exp(-\eta / f),$$

где $f = F / F_R$ – безразмерное поле, $F_R = \varphi^2 / c_s^2$ – поле устранения барьера, $\eta = b_{FN} c_s^2 \varphi^{-1/2}$; $c_s = (e^3 / 4\pi\epsilon_0)^{1/2} \cong 3.79 \cdot 10^{-5}$ [эВ (В/м)^{-1/2}] – константа Шоттки; $a_{FN} = e^3 / 8\pi h$ – первая константа Фаулера-Нордгейма.

Дальнейшее повышение точности было достигнуто в аппроксимации НР (High-Precision) [7]. В ней функции v_F и u_F представлены в виде полиномов высокой степени (4)–(5), что обеспечивает близость с численным интегрированием для барьера Шоттки:

$$I = A_{eff} a_{FN} (v_F + (4/3) f u_F)^{-2} \varphi^{-1} F_R^2 f^2 \cdot \exp(-v_F b_{FN} \varphi^{3/2} F_R^{-1} / f),$$

$$v_F = (1-f) \sum_{i=0}^5 p_i f^i + \ln(f) \sum_{i=0}^5 q_i f^i, \quad (4)$$

$$u_F = u_1 - (1-f) \sum_{i=0}^5 s_i f^i - \ln(f) \sum_{i=0}^5 t_i f^i, \quad (5)$$

где A_{eff} – площадь эмиссии, $u_1 = 3\pi/(8\sqrt{2})$, а коэффициенты p_i , q_i , s_i , t_i представлены в работе [8]; $b_{FN} = (4/3)(2m_e)^{1/2} / e$ – вторая константа Фаулера-Нордгейма; e , ϵ_0 , m_e , h – элементарный заряд, электрическая постоянная, масса электрона и постоянная Планка.

Аналитические аппроксимирующие формулы справедливы лишь в приближении плоской поверхности. Для эмиттеров с нанометровым радиусом кривизны ($r < 20$ нм) использование этих формул приводит к заметным расхождениям при расчете ВАХ. Численные методы лишены ограничения приближения плоской поверхности: прямой расчет интеграла Гамова использует все рассмотренные формы барьера, в том числе учитывающую геометрию катода. Последующее численное интегрирование по энергиям позволяет получить эталонную ВАХ.

В рамках данной работы реализован алгоритм численного интегрирования, позволяющий построить ВАХ металлического катода с использованием трех моделей потенциального барьера: треугольного, Шоттки-Нордгейма и Кирицакиса. Детальное описание этого алгоритма приведено в следующем разделе.

Описание численного алгоритма и программной реализации

В основе разработанной программы лежит алгоритм прямого численного интегрирования, позволяющий вычислить плотность эмиссионного тока $J(F)$ для металлического катода для рассмотренных ранее форм потенциального барьера. Входными данными служат работа выхода материала φ , температура T , радиус кривизны эмиттера r , диапазон значений напряженности электрического поля F .

Для каждого значения поля F и каждой величины нормальной энергии электрона E_n программа строит профиль потенциального барьера $M(z)$, используя одну из трех моделей (1)–(3). Затем определяются границы области туннелирования, в которой $M(z) > 0$, путем

численного поиска корней уравнения $M(z) = 0$; найденные значения z_1 и z_2 служат пределами в интеграле Гамова:

$$G = g \cdot \int_{z_1}^{z_2} \sqrt{M(z)} dz.$$

где $g \approx 10.246 \left[\frac{1}{\sqrt{\varepsilon B \cdot n_m}} \right]$ – константа Гамова.

Далее программа вычисляет вероятность туннелирования электрона сквозь барьер:

$$\begin{cases} D = 1/(1 + \exp(G)), & G < 10 \text{ (полный Кембл)} \\ D = 1 / ((\exp(G))), & G \geq 10 \text{ (упрощенный Кембл)} \end{cases}$$

где D – прозрачность барьера.

Далее вычисляется функция, которая отражает плотность электронных состояний:

$$N = z_s \cdot kT \cdot \ln \left(1 + \exp \left(\frac{-E_n}{kT} \right) \right),$$

где z_s – постоянная Зоммерфельда, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Заключительный шаг алгоритма состоит в вычислении полной плотности эмиссионного тока как интеграла по всем возможным значениям нормальной энергии:

$$J = \int_{E_{n,\min}}^{E_{n,\max}} N \cdot D dE_n$$

Нижний предел интегрирования $E_{n,\min}$ выбирается достаточно глубоко на энергетической диаграмме, от $E_{n,\min} = -5$ эВ. Верхний предел $E_{n,\max}$ берется равным $10kT$. Для энергий выше ϕ барьер формально исчезает, и прозрачность $D \rightarrow 1$. Таким образом, описанный алгоритм реализует универсальный численный подход к расчету полевой эмиссии, позволяя легко заменять модель потенциального барьера и получать высокоточные ВАХ для произвольных параметров катода.

Результаты численного моделирования и их анализ

На рис. 1а приведены профили потенциального барьера $M(z)$, рассчитанные для трех моделей. Треугольный барьер имеет наибольшую высоту и ширину. Барьер Шоттки-Нордгейма демонстрирует характерный максимум вблизи поверхности и заметно более узкую область туннелирования, что качественно объясняет значительно более высокую прозрачность и, как следствие, большие эмиссионные токи. Барьер Кирицакиса, учитывающий кривизну эмиттера, при $r = 20$ нм практически совпадает с барьером Шоттки вблизи вершины, но оказывается чуть выше в средней части, что приводит к небольшому увеличению его ширины. Это различие становится принципиальным при переходе к меньшим радиусам кривизны, где форма барьера Кирицакиса заметно отличается от плоского случая. Полученные ВАХ для всех трех моделей, а также аналитические кривые Мерфи – Гуда (простая MG) и НР-аппроксимации показаны на рис. 1б. Треугольный барьер дает более чем на два порядка меньший ток по сравнению с моделями, учитывающими силы изображения. Численные кривые для барьеров Шоттки и Кирицакиса практически совпадают между собой и с аналитическими формулами, подтверждая корректность численного метода и высокую точность НР-приближения.

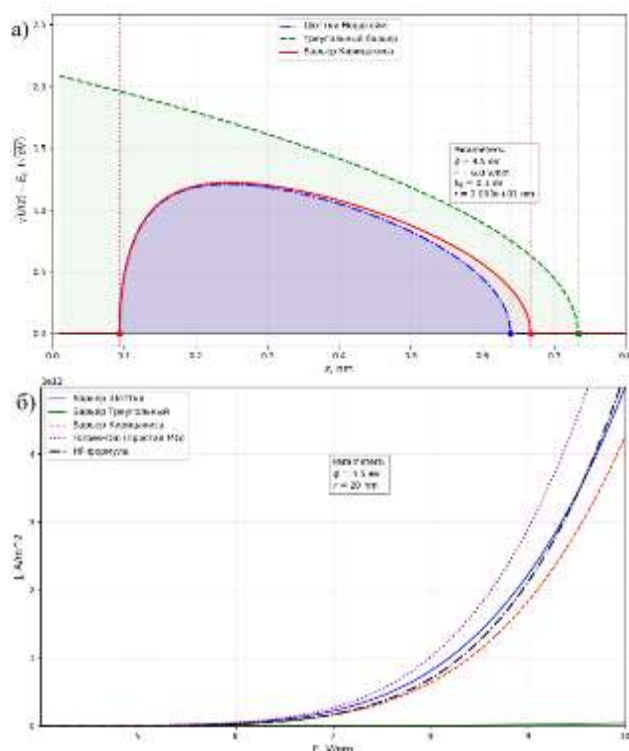


Рис. 1. Сравнение трех моделей: а) профили потенциальных барьеров; б) вольт-амперные характеристики

Таким образом, реализованный алгоритм обеспечивает универсальную основу для подобных расчетов и может применяться при проектировании холодных катодов устройств вакуумной микроэлектроники.

Список литературы

1. Hawkes P. W. Cold field emission and the scanning transmission electron microscope //Advances in Imaging and Electron Physics. – 2009. – Vol. 159.
2. Parmee R. Xray Generation by Field Emission: дис. – 2018.
3. Makela J. M., Washeleski R. L., King L. B. Regenerable field emission cathode for spacecraft neutralization //Journal of Propulsion and Power. – 2009. – Vol. 25. – №. 4. – P. 970-975.
4. Fowler R. H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields // Proceedings of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical and physical character. – 1928. – Vol. 119. – №. 781. – P. 173–181.
5. Murphy E. L., Good Jr R. H. Thermionic emission, field emission, and the transition region // Physical review. – 1956. – Vol. 102. – №. 6. – P. 1464.
6. Kyritsakis A. General form of the tunneling barrier for nanometrically sharp electron emitters //Journal of Applied Physics. – 2023. – Vol. 133. – №. 11.
7. Forbes R. G., Popov E. O., Kolosko A. G., Filippov S. V., The pre-exponential voltage-exponent as a sensitive test parameter for field emission theories //Royal Society open science. 2021. Vol. 8. №. 3. P. 201986-1 – 19.
8. Kolosko A. G., Popov E. O., Filippov S. V. Method for estimation effective parameters of field cathodes using high-precision multiparameter field emission equations //Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Seriya 10. Prikladnaya Matematika. Informatika. Protsessy Upravleniya. – 2025. – T. 21. – №. 1. – С. 47-57.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНВЕРСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

НИКУРАДЗЕ П.А.1, ИВАНОВ А.Г.1, ЮРЧЕНКОВ М.И.1, КАРПОВ Д.А.1

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Аннотация. В данной работе исследуется инверсная магнетронная распылительная система. Целью экспериментов является определение магнитной системы, которая реализует наибольшую скорость роста покрытия при наименьшем тепловом воздействии на подложку.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, инверсная магнетронная распылительная система, вольт-амперные характеристики, магнитная система, высокотемпературный сверхпроводник.

1. Введение

Магнетронные распылительные системы широко используются в промышленности и науке для нанесения плёнок. Магнетронная распылительная система (МРС) состоит из катода, анода и магнитной системы. По форме катода МРС разделяют на планарные МРС, МРС с цилиндрическим катодом, МРС с коническим катодом и инверсные МРС. Магнетронные распылительные системы позволяют наносить любые материалы с высокой скоростью роста покрытия [1].

В отличие от классического магнетрона, где катод выполнен плоским, в инверсной системе катод представляет собой полый цилиндр, распыление материала происходит с его внутренней поверхности. Анод, как правило, выполняется в виде стержня, расположенного коаксиально внутри катода. Такая геометрия обеспечивает ряд преимуществ: атомы распылённого материала, не попавшие на подложку, могут возвращаться на катод и повторно распыляться, что в сочетании с подвижной магнитной системой позволяет достичь коэффициента использования мишени до 80–90% [2]. В конструкции может быть использована как одна, так и несколько катодных секций для формирования многокомпонентных покрытий [3].

Благодаря возможности всесторонне и равномерно осаждать распыляемый материал, инверсные магнетронные системы (ИМРС) применяются для нанесения покрытий на проволоку, волокна, ленты и детали со сложной геометрией. Также в виду высокого коэффициента использования материала инверсные магнетроны используются для нанесения дорогостоящих металлов, например, платины, золота и серебра [4]. Инверсные магнетронные системы используются не только для нанесения покрытий, но и для измерения высокого вакуума [5].

Целью данной работы являлась оптимизация магнитной системы, разрабатываемой инверсной МРС, предназначенной для нанесения серебряных плёнок на ленты с высокотемпературным сверхпроводником.

2. Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментов разработан макет инверсной МРС. Диаметр катода составляет 130 мм, толщина 3 мм, длина 120 мм. Катод прижимается к водоохлаждаемому корпусу, являющемуся стенкой вакуумной камеры. Анод выполнен в виде водоохлаждаемой трубки (диаметром 3 мм), проходящей коаксиально катоду. Подложка с термопарой К-типа монтировалась по оси катода. Магнитопровод выполнен из стали 3 толщиной 4 мм. Схема макета представлена на рисунке 1.

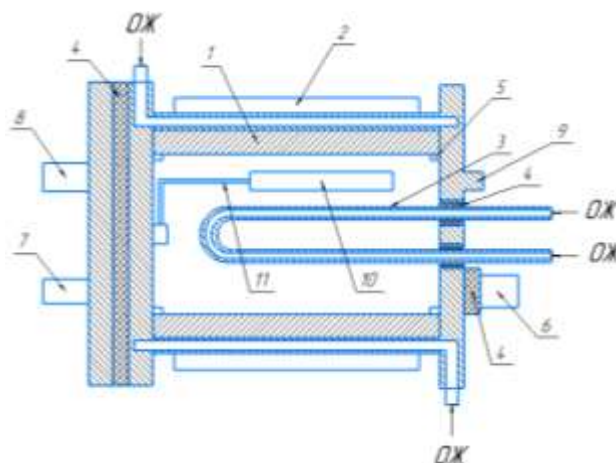


Рисунок 1 – макет инверсной МРС: 1 – катод, 2 – магнитная система, 3 – анод, с системой водного охлаждения, 4 – диэлектрический изолятор, 5 – прижимные кольца, 6 – фланец системы вакуумной откачки, 7 – фланец системы напуска рабочего газа, 8 – фланец для крепления вакуумметра, 9 – клемма для подключения питания; 10 – подложка; 11 – крепление подложки.

Для определения скорости нанесения покрытия и теплового воздействия, оказываемого на подложку во время роста покрытия, были выбраны 2 магнитные системы (МС). В каждой МС изменялось расстояние между магнитами. Для проведения экспериментов было выбрано 3 расстояния между магнитами: 10 мм, 40 мм и 70 мм. Кубические (со стороной 10 мм) NdFeB магниты марки N38 набирались в кольца на магнитопроводе, коаксиальному катоду, и находящемуся с внешней стороны водоохлаждаемого корпуса.

МС №1 и №2 представлены на рисунке 2. В МС №1 полюса магнитов имеют радиальную ориентацию по отношению к цилиндрическому катоду. В МС №2 полюса магнитов имеют осевую ориентацию по отношению к цилиндрическому катоду.

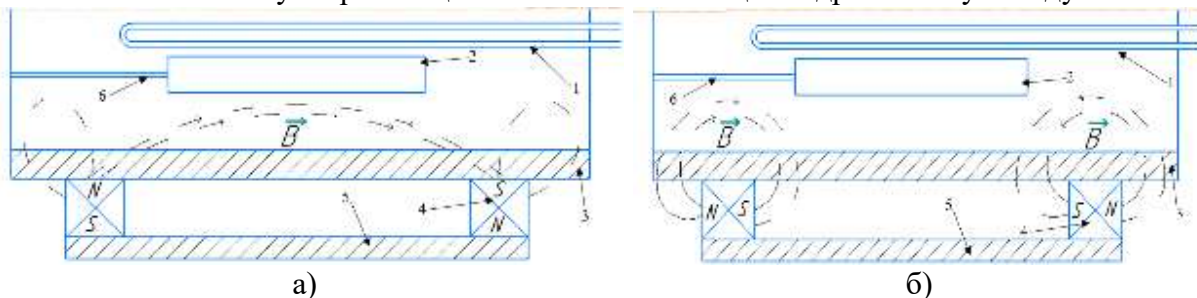


Рисунок 2 – магнитная система: а) №1 с радиально-направленными полюсами магнитов б) №2 с полюсами магнитов направленными в осевом направлении: 1 – анод; 2 – подложка; 3 – катод; 4 – магниты; 5 – магнитопровод; 6 – термопара.

3. Вольт-амперные характеристики

Перед проведением экспериментов по нанесению покрытия были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) для каждой магнитной системы. ВАХ снимались при давлении в камере равным 0,8 Па. ВАХ для МС №1 и для МС №2 представлены на рисунке 3.

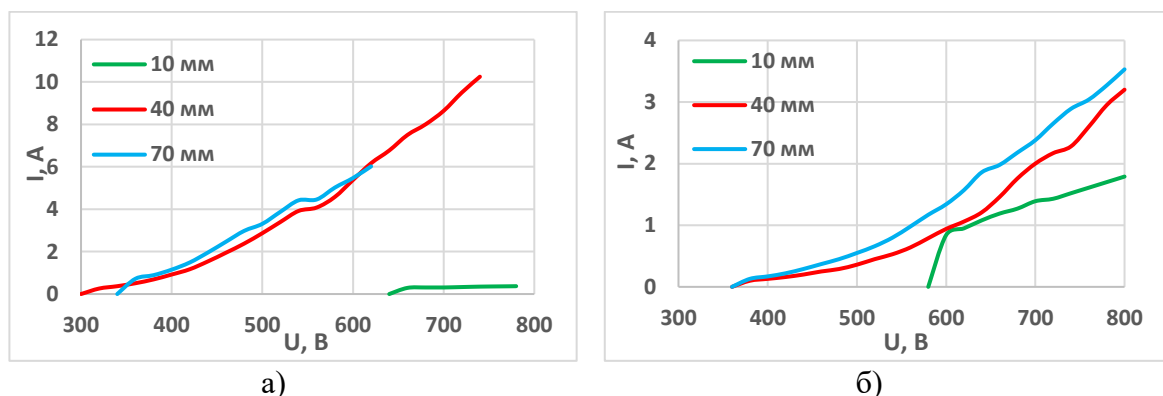


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики инверсной MPC с а) МС №1 б) с МС №2

МС №1 с расстоянием между магнитами 10 мм и МС №2 с расстоянием между магнитами 10 мм начинают процесс распыления при более высоких значениях напряжения. Магнитные системы с радиальным расположением полюсов постоянных магнитов реализуют более высокие значения силы тока и соответственно более высокие значения мощности. В МС №1 с расстоянием 70 мм между магнитами был остановлен процесс распыления материала при повышенных значениях напряжения, так как наблюдался неконтролируемый рост тока. Магнитные системы с осевым расположением полюсов постоянных магнитов демонстрируют более стабильную работу при высоких значениях напряжения. МС №1 с расстоянием 40 мм между магнитами позволяет работать при низких значениях напряжения.

Исходя из ВАХ наиболее оптимальной системой является МС №1 с расстоянием 40 мм между магнитами, так как она позволяет реализовать наибольшую мощность и работать как при низких значениях напряжения, так и при высоких.

4. Эксперименты по нанесению покрытия на пластину

Для определения скорости роста покрытия и тепловой нагрузки на подложку были проведены эксперименты продолжительностью 10 минут на мощности 500 Вт. Тепловая нагрузка снималась при помощи термопары, закрепленной на подложке.

Перед проведением экспериментов в рабочей камере создавался вакуум, равный $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем в камеру напускался рабочий газ – аргон до рабочего давления в 0,8 Па. В качестве подложки использовалась пластина из нержавеющей стали толщиной 1 мм, длина пластин равнялась 15 см, а толщина - 2 см. Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по нанесению покрытия на пластину.

	Магнитная система №1			Магнитная система №2		
	10	40	70	10	40	70
Расстояние между магнитами, мм	10	40	70	10	40	70
Толщина покрытия, нм	416	718	980	983	878	718
Температура подложки, °C	165	135	165	172,5	130	160

МС №2 с расстоянием 10 мм между магнитами и МС №1 с расстоянием 70 мм между магнитами показали наибольшую скорость роста покрытия. Были проведены эксперименты на повышенной мощности, чтобы получить необходимые 700 нм за 100 секунд. В результате МС №1 показала температуру в 1,5 раза меньше, чем МС №2 (107 °C и 157 °C соответственно).

Для проведения дальнейших экспериментов были выбраны 3 системы. МС №1 с расстоянием 70 мм между магнитами, как магнитная система с наибольшей скоростью роста покрытия, МС №2 с расстоянием 40 мм между магнитами и МС №1 с расстоянием 40 мм между магнитами, как магнитные системы с наименьшей тепловой нагрузкой на подложку. В дальнейших экспериментов использовались данные магнитные системы.

5. Эксперименты по нанесению покрытия на ленту

Перед проведением экспериментов в рабочей камере создавался вакуум, равный $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Для очистки поверхности подложки и улучшения адгезии проводился тлеющий разряд в течении 30 минут. Затем создавалось рабочее давление равное 0,8 Па. Эксперименты проводились в течение 100 секунд на мощности 2 кВт.

В качестве подложки выступает лента из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, длиной 90 мм и шириной 12 мм. Результаты экспериментов по нанесению покрытия представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов по нанесению покрытия на ленту.

	Магнитная система №1	Магнитная система №1	Магнитная система №2
Расстояние между магнитами, мм	40	70	40
Толщина покрытия, нм	827	950	728
Температура подложки, °C	282	235	390

МС №1 с расстоянием 70 мм между магнитами показывает наибольшую скорость роста покрытия и наименьшую тепловую нагрузку, однако покрытия имеют плохую адгезию. МС №2 с расстоянием 40 мм между магнитами показывает наименьшую скорость роста покрытия при наибольшей тепловой нагрузке. МС №1 с расстоянием 40 мм между магнитами показывает высокую скорость роста покрытия и наилучшую адгезию. Некачественная адгезия покрытия при использовании МС №1 с расстоянием 70 мм может быть связана с подпылением торцевых крышек корпуса магнетронной системы при более широкой магнитной арке и зоне горения плазмы.

6. Вывод

Для разработки инверсной МРС была выбрана МС №1 с расстоянием 40 мм между магнитами, так как данная система позволяет наносить материал с высокой скоростью при умеренной тепловой нагрузке на подложку. Также плёнки, полученные при помощи данной конфигурации магнитной системы, имеют наилучшую адгезию к подложке.

Список литературы

1. Kukla R. Magnetron sputtering on large scale substrates: an overview on the state of the art // Surface and Coatings Technology. – 1997. – V. 93. – No. 1. – P. 1-6.
2. Glocker D.A. Principles and Applications of Hollow Cathode Magnetron Sputtering Sources // Society of Vacuum Coaters. 1995. Technical paper. 6 p.
3. System of inverted magnetrons for the formation of multilayer composites on axisymmetric small-sized substrates / A. A. Lozovan, A. S. Lenkovets, N. A. Ivanov, S. S. Alexandrova, E. P. Kubatina // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1121. – P. 012020.
4. Amberg M. Active vacuum gauges: application to inverted magnetrons // Vacuum. 1992. Vol. 43, Iss. 5–7. P. 677–679.

5. Mao H., Wang Y. Inverted-magnetron cold-cathode gauge in hybrid-discharge mode // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2007. Vol. 25, No. 2. P. 281–284.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Новиков И.А.,²

¹ООО «Активная Фотоника»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе представлены результаты исследования доменной структуры плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) при воздействии внешнего магнитного поля. С использованием разработанного вспомогательного модуля, обеспечивающего управляемое магнитное поле напряжённостью до 2500 Гс с возможностью регулировки его ориентации, проведена серия измерений, демонстрирующих последовательную перестройку доменных границ при увеличении приложенного поля от 0 до 250 Гс.

Ключевые слова: железо-иттриевый гранат (ЖИГ), магнитно-силовая микроскопия (МСМ), сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), доменная структура, внешнее магнитное поле, спинтроника, магноника.

1. Железо-иттриевый гранат: актуальность и перспективы применения

Железо-иттриевый гранат (ЖИГ, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) является одним из наиболее значимых магнитооптических материалов современной физики твёрдого тела и прикладной электроники. Широкий интерес к этому соединению обусловлен уникальным сочетанием физических свойств: исключительно низкими потерями на перемагничивание, высокой степенью магнитооптического эффекта Фарадея, а также возможностью управлять характеристиками материала посредством легирования редкоземельными элементами и ионами висмута или церия [1].

В рамках бурно развивающейся области радиофотоники ЖИГ и его легированные аналоги (Ce:YIG, Bi:YIG) являются ключевыми функциональными материалами. На их основе создаются невзаимные оптические устройства – изоляторы и циркуляторы, – а также магнитооптические модуляторы света, фазовращатели и перестраиваемые фильтры на магнитостатических волнах [2–4]. Именно магнитостатические волны, распространяющиеся в тонких эпитаксиальных плёнках ЖИГ, рассматриваются как перспективная основа для создания энергоэффективных логических элементов спинволновых вычислительных устройств нового поколения [4].

Интерес к ЖИГ не ограничивается фотонными приложениями. В области спинтроники данный материал привлекателен благодаря возможности генерировать и детектировать спиновые токи и спиновые волны (магноны) с рекордно малым затуханием на ГГц-частотах. Исследования показывают, что на основе ЖИГ реализуемы устройства спиновой логики, спиновые насосы и генераторы спиновых волн, интегрируемые с планарными структурами из тяжёлых металлов (Pt, W) [1]. Всё это определяет ЖИГ как стратегически важный материал для дальнейшего развития микроэлектроники.

Вместе с тем качество работы устройств на основе ЖИГ напрямую определяется доменной структурой плёнок и её откликом на внешнее магнитное поле [5]. Возможность управлять перестройкой доменных границ, понимать механизмы зарождения и исчезновения доменов, а также измерять поля насыщения и коэрцитивные поля на наноуровне – критически важные задачи материаловедческой диагностики. Именно поэтому разработка и совершенствование приборных комплексов для наблюдения доменной структуры ЖИГ в условиях приложения внешнего поля является актуальной научно-технической задачей [3, 5].

2. Разработанные методики исследования доменной структуры

Для решения поставленных диагностических задач была создана и апробирована приборная база на основе сканирующего зондового микроскопа с рядом вспомогательных модулей, существенно расширяющих его функциональные возможности применительно к исследованию магнитных материалов [3].

Принцип работы магнитно-силового микроскопа основан на использовании зонда с магнитным покрытием. При сближении с образцом между ними возникают магнитные силы, вызывающие изгиб кантилевера, что позволяет фиксировать распределение магнитных полей рассеяния над поверхностью образца. Для расширения ресурса зондовых датчиков был разработан зонд капиллярного типа – полый капилляр с запаянным кончиком, внутри которого располагаются магнитные наночастицы структуры ядро-оболочка (оксид железа / SiO_2) [6]. Суперпарамагнитные свойства наночастиц обеспечивают их мгновенную ориентацию в приложенном поле, а структура ядро-оболочка предотвращает агломерацию, значительно продлевая срок службы зонда.

Ключевым инструментом настоящего исследования послужил вспомогательный модуль внешнего магнитного поля, встраиваемый в основание атомно-силового микроскопа [7–9]. Конструкция модуля предполагает использование постоянных неодимовых магнитов ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) с магнитопроводами из пермендюра, обеспечивающими поле напряжённостью до 2500 Гс в зазоре. Применение постоянных магнитов вместо электромагнитов позволяет снизить массу модуля, исключить необходимость охлаждения и, следовательно, минимизировать паразитные вибрации и термический дрейф параметров – критически важное условие для прецизионных МСМ-измерений.

Принципиальным усовершенствованием по сравнению с предшествующими аналогами [10–12] стала возможность изменять ориентацию вектора магнитной индукции относительно плоскости образца. Асимметричная геометрия магнитопроводов формирует в рамках одной конструкции две зоны: с горизонтальной (в плоскости образца) и вертикальной (перпендикулярной поверхности) ориентацией поля. Это открывает возможность изучения материалов как с планарной, так и с перпендикулярной магнитной анизотропией – в том числе плёнок ЖИГ с их характерной полосовой доменной структурой. Конструкция модуля рассчитана на стандартные образцы размерами $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с толщиной не более 1,3 мм, что полностью соответствует параметрам типичных подложек с эпитаксиальными плёнками ЖИГ.

Дополнительно к МСМ-методике в состав диагностического комплекса был включён магнитооптический модуль на основе эффекта Керра, интегрированный со штатной системой видеонаблюдения СЗМ [13]. Данный модуль позволяет решить две принципиальные проблемы, характерные для зондовой микроскопии: низкое временное разрешение (МСМ требует нескольких минут на кадр, тогда как Керр-микроскопия обеспечивает наблюдение в реальном времени) и ограниченное поле зрения ($\leq 100 \text{ мкм}$ для

АСМ против сотен микрон для оптики). Для плёнок ЖИГ с характерными размерами доменов от единиц до сотен микрон последнее обстоятельство имеет принципиальное значение.

3. Результаты исследования доменной структуры ЖИГ

С применением описанной приборной базы было проведено МСМ-исследование поведения доменной структуры эпитаксиальной плёнки железо-иттриевого граната в условиях пошагового увеличения вертикального внешнего магнитного поля. Серия изображений, полученных в диапазоне от 0 до 250 Гс, демонстрирует характерную перестройку доменной картины (рис. 1).

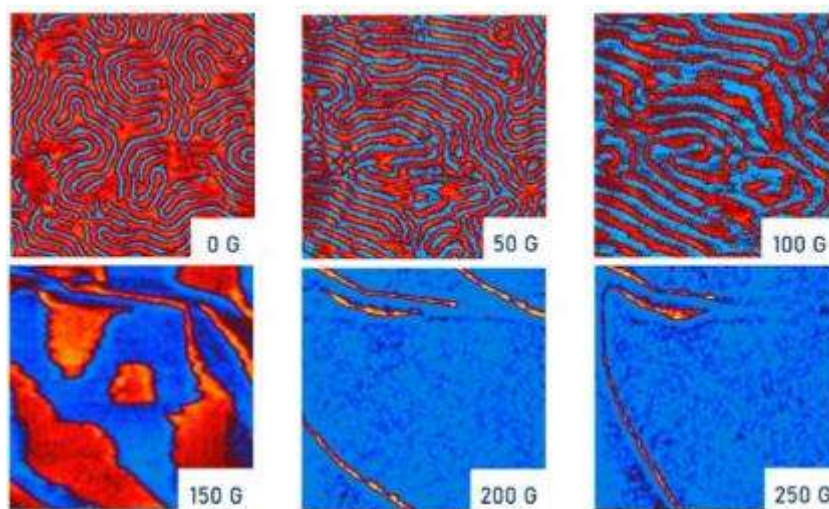


Рис. 1. МСМ-изображения доменной структуры плёнки ЖИГ при различных значениях внешнего вертикального магнитного поля: 0, 50, 100, 150, 200 и 250 Гс

При нулевом поле на поверхности образца наблюдается характерная лабиринтная (полосовая) доменная структура с хаотически ориентированными доменными границами – типичная картина для плёнок ЖИГ с перпендикулярной магнитной анизотропией. По мере увеличения приложенного поля до 50–100 Гс происходит упорядочение доменного рисунка: области, намагниченные вдоль приложенного поля, начинают расширяться за счёт смещения доменных стенок, тогда как антипараллельные домены сужаются.

При значениях поля 150–200 Гс наблюдается качественное изменение морфологии: лабиринтная структура трансформируется в систему вытянутых полосовых доменов с выраженной ориентацией вдоль направления поля. Область сканирования при этом преимущественно занята крупными доменами с намагниченностью, параллельной внешнему полю. При 250 Гс процесс перемагничивания подходит к завершению: большая часть поверхности представляет собой однородно намагниченную фазу; сохраняющиеся одиночные полосовые домены свидетельствуют о близости к полю насыщения данной плёнки.

Полученные данные позволяют количественно оценить поле насыщения плёнки ЖИГ, проследить кинетику смещения доменных стенок и верифицировать параметры разработанных устройств на основе данного материала. Разработанная методика, объединяющая МСМ с управляемым источником внешнего поля, является эффективным инструментом для исследования магнитооптических материалов в условиях, приближённых к реальным эксплуатационным режимам.

Заключение

В ходе настоящей работы были продемонстрированы возможности разработанного диагностического комплекса на основе СЗМ с вспомогательными модулями внешнего магнитного поля и магнитооптическим модулем Керра применительно к исследованию железо-иттриевого граната. Полученные МСМ-изображения наглядно демонстрируют стадийную перестройку полосовой доменной структуры плёнки ЖИГ при пошаговом увеличении вертикального поля от 0 до 250 Гс. Разработанные методики применимы для диагностики широкого класса магнитооптических материалов, используемых в спинтронике, магнотронике и радиофотонике.

Список литературы

1. Arsad A.Z., Hamid M.A., Abd Rahim D.A., Ismail W.Z.W., Majid W.H.A. Recent Advances in Yttrium Iron Garnet Films: Methodologies, Characterization, Properties, Applications, and Bibliometric Analysis for Future Research Directions // Applied Science. – 2023. – Т. 13. – №. 2. – С. 1218.
2. Stadler B.J.H., Mizumoto T. Integrated magneto-optical materials and isolators: A review // IEEE Photonics Journal. – 2014. – Т. 6. – №. 1. – С. 6678206.
3. Askarzadeh N., Alipour M., Abedinzadeh R., Ghanbari A. Magneto-optical garnets in photonic integration // Results in Physics. – 2025. – Т. 78. – №. 108473.
4. Devitt C., Srinivasan K., Bhavé S., Bhavé S.A. An edge-coupled magnetostatic bandpass filter // Nature Communications. – 2024. – Т. 15. – №. 7764.
5. Mendil J., Trassin M., Tang M.H., Schaab J., Gross T., Heide C., Fischer P., Fiebig M., Gambardella P. Magnetic properties and domain structure of ultrathin yttrium iron garnet/Pt bilayers // Physical Review Materials. – 2019. – Т. 3. – №. 034403.
6. Патент № 2818681 С1 Российская Федерация, МПК G01Q 60/08, G01Q 70/08. Зонд для магнитно-силовой микроскопии : № 2023129275 : заявл. 13.11.2023 : опубл. 03.05.2024 / Козодаев Д.А., Яковлева А.А., Новиков И.А. [и др.] ; заявитель ООО «НОВА СПб».
7. Патент № 2833421 С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/12. Источник внешнего магнитного поля для магнитно-силовой микроскопии : заявл. 25.04.2024 : опубл. 21.01.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, С. В. Костромин ; заявитель ООО "АКТИВНАЯ ФОТОНИКА".
8. Kozodaev D.A., Novikov I.A., Kostromin S.V., Trusov M.A., Moshnikov V.A. External magnetic field source for nanoscale research // The 22nd International Conference on Magnetism: Book of Abstracts (ICM 2024). – Bologna, 2024.
9. Kozodaev D.A., Moshnikov V.A., Novikov I.A. Additional module for creating an external magnetic field for magnetic force microscopy // IX Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism». – 2025. – V. 1. – P. 124–125.
10. Proksch R., Runge E., Hansma P.K., Gurley J., Elings V., Bhaumik S. High field magnetic force microscopy // Journal of Applied Physics. – 1995. – V. 78. – P. 3303–3307.
11. Gomez R.D., Burke E.R., Mayergoyz I.D. Magnetic imaging in the presence of external fields: Technique and applications // J. Appl. Phys. – 1996. – V. 79. – P. 6441–6446.
12. Shinigawa H., Takamasu T., Kido G. Development of variable-temperature scanning probe microscope for high magnetic fields // Physica B. – 2001. – V. 298. – P. 580–584.
13. Патент № 2849975 С1 Российская Федерация, МПК G01Q 60/02, B82Y 35/00. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещённый с магнитооптическим микроскопом, для исследования магнитных материалов с перпендикулярной магнитной анизотропией : заявл. 05.08.2024 : опубл. 01.11.2025 / Козодаев Д.А., Новиков И.А., Кимель А.В., Хусяинов Д.И., Ступакевич А. ; заявитель ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА».

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ 3D- ПЕЧАТИ МЕТОДОМ SLS

НЭТУ М.Л., МИХАЙЛОВ И.И.

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе рассматривается повышение точности аддитивного производства методом селективного лазерного спекания (SLS). Проведён комплексный анализ факторов, вызывающих геометрические отклонения готовых изделий, — прежде всего усадки материала. Представлена

методика поэтапной калибровки параметров слайсера: определение оптимальной мощности лазера, подбор коэффициентов масштабирования по осям X, Y и Z, а также выбор значения отступа (offset). Для каждого этапа изготавливались тестовые образцы на SLS-принтере ONSINT SM200 с использованием порошка полиамида 12, после чего проводились их измерения и сравнение с исходными размерами 3D-моделей. В результате определены оптимальные значения: мощность лазера — 11 Вт (контур) / 10 Вт (заполнение); коэффициент масштабирования по осям X и Y — 1,033, по оси Z — 1,000; отступ — 0,25 мм. Средняя погрешность размеров при применении найденных параметров составила 0,023 мм.

Ключевые слова: SLS-печать, селективное лазерное спекание, точность, усадка, коэффициент масштабирования, отступ, полиамид 12, калибровка.

Введение

Технология 3D-печати методом селективного лазерного спекания (SLS) привлекает широкое внимание благодаря возможности создавать сложные трёхмерные объекты из термопластичных порошков без применения поддерживающих структур. Несмотря на значительный потенциал применения в различных областях, точность размеров SLS-изделий по-прежнему уступает традиционным методам механической обработки.

Геометрические отклонения возникают в процессе печати и в наибольшей степени определяются усадкой материала, термическими напряжениями, а также особенностями используемого порошка. Усадка зависит от параметров печати: мощности лазера, толщины слоя, температуры рабочей камеры и др.

Проблему усадки можно решить двумя способами: адаптировав конструкцию для компенсации производственных недостатков либо улучшив сам производственный процесс путём корректировки условий сборки. Настоящая работа посвящена первому подходу — адаптации конструкции посредством настройки параметров слайсера: коэффициента масштабирования по осям X, Y, Z и отступа (offset).

1. Принцип работы и оборудование

SLS-принтер создаёт объект послойным спеканием порошка. Сначала модель разбивается на горизонтальные срезы и загружается в систему управления. Перед началом печати рабочая камера нагревается до температуры чуть ниже точки плавления порошка — это снижает тепловые деформации и облегчает спекание. Платформа построения опускается на толщину одного слоя, а разравниватель наносит ровный слой порошка с платформы подачи. Лазер сканирует необходимую площадь поперечного сечения, спекая частицы, после чего цикл повторяется. Неспечённый порошок служит опорой для выступающих элементов [1, 2].

В экспериментах использовался промышленный SLS-принтер ONSINT SM200, оснащённый CO₂-лазером и высокоскоростной сканаторной системой (рабочая скорость до 5 м/с). Система стабилизации рабочей температуры обеспечивает высокую повторяемость результатов. В качестве материала применялся порошок полиамида 12 (PA12), дающий усадку в пределах 2–5% [4, 5].

Фиксированные параметры печати: скорость сканирования — 2500 мм/с, толщина слоя — 0,12 мм, температура слоя — 158 °С.

2. Повышение точности печати

2.1. Мощность лазера

На первом этапе исследовалось влияние мощности лазера на качество изделий. Было проведено 9 экспериментов с различными значениями мощности (таблица 1). Визуальный анализ образцов показал, что в экспериментах 5–9 порошок приобрёл желтоватый оттенок

вследствие перегрева. В экспериментах 1–4 изменения цвета не наблюдалось, однако при недостаточной мощности детали получались пористыми из-за неполного спекания.

По совокупности характеристик оптимальной признана мощность третьего эксперимента: 11 Вт для контура и 10 Вт для заполнения.

Таблица 1

Соответствие номера эксперимента и мощности лазера

Эксперимент №	Мощность контура, Вт	Мощность заполнения, Вт
1	5	4
2	8	7
3	11	10
4	15	11
5	25	24
6	30	29
7	37	38
8	45	44
9	50	49

2.2. Коэффициент масштабирования

На втором этапе подбирался коэффициент масштабирования — числовой множитель, применяемый к размерам 3D-модели для компенсации усадки. При нагреве порошок расширяется, а при охлаждении сжимается вследствие термического сокращения и кристаллизации. Для полиамида 12 усадка составляет 2–5%, что соответствует коэффициентам в диапазоне 1,02–1,05 [4].

Тестовая деталь имела размеры: $X' = 114$ мм, $Y' = 19$ мм, $Z' = 4$ мм. Проведено 7 экспериментов с различными коэффициентами масштабирования (таблицы 2, 3). Погрешность рассчитывалась по формуле: $\Delta L = (|\Delta X| + |\Delta Y| + |\Delta Z|) / 3$.

Таблица 2

Размеры деталей при различных коэффициентах масштабирования

№	Kx	Ky	Kz	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	1,025	1,025	1,000	113,00	18,78	4
2	1,030	1,030	1,000	113,67	18,87	4
3	1,033	1,033	1,000	114,07	19,00	4
4	1,035	1,035	1,000	114,27	19,08	4
5	1,036	1,036	1,000	114,35	19,05	4
6	1,038	1,038	1,000	115,00	19,35	4
7	1,040	1,040	1,000	115,20	19,32	4

Таблица 3

Отклонения от исходных размеров при различных коэффициентах масштабирования

№	K _x	K _y	K _z	ΔX, мм	ΔY, мм	ΔZ, мм	ΔL, мм
1	1,025	1,025	1,000	–1	–0,22	0,000	0,41
2	1,030	1,030	1,000	–0,33	–0,13	0,000	0,15
3	1,033	1,033	1,000	0,07	0,00	0,000	0,023
4	1,035	1,035	1,000	0,27	0,08	0,000	0,36
5	1,036	1,036	1,000	0,35	0,05	0,000	0,13
6	1,038	1,038	1,000	1,00	0,35	0,000	0,45
7	1,040	1,040	1,000	1,20	0,32	0,000	0,51

По результатам экспериментов наименьшую среднюю погрешность ($\Delta L = 0,023$ мм) обеспечил эксперимент №3 с коэффициентами: $K_x = K_y = 1,033$, $K_z = 1,000$. Разница между коэффициентами для горизонтальных осей и оси Z объясняется анизотропией усадки: в горизонтальных направлениях она обусловлена термическим сжатием, кристаллизацией и остаточными напряжениями, тогда как по оси Z послойный процесс ограничивает деформации.

2.3. Отступ

На третьем этапе подбиралось значение отступа (offset) — программной корректировки контуров 3D-модели в слайсере: внешний контур смещается внутрь, а диаметр отверстий увеличивается. Для полиамида PA12 типичные значения отступа составляют 0,05–0,3 мм [4].

Изготавливались пары деталей — крышка и корпус, которые должны соединяться плотно, без зазора и люфта. При проектировании предусмотрен конструктивный зазор 0,1 мм. Для всех деталей использовались найденные коэффициенты масштабирования ($K_x = K_y = 1,033$, $K_z = 1,000$).

По результатам практической стыковки оптимальным признан отступ 0,25. Пара соединяется плотно, без зазоров и люфта, легко разъединяется без приложения значительных усилий. При большем отступе наблюдался зазор между деталями; при меньшем — детали не состыковывались до конца. Погрешность размеров при отступе 0,25 мм: высота крышки — 0,20 мм, корпуса — 0,27 мм; прочие размеры — в пределах 0,01–0,14 мм.

Заключение

В работе экспериментально определены оптимальные параметры слайсера для повышения точности SLS-печати из полиамида 12 на принтере ONSINT SM200. Установлена оптимальная мощность лазера: 11 Вт для контура и 10 Вт для заполнения. Найденны коэффициенты масштабирования: $K_x = K_y = 1,033$, $K_z = 1,000$, обеспечивающие среднюю погрешность 0,023 мм. Определено оптимальное значение отступа — 0,25 мм, при котором пара сопрягаемых деталей соединяется без зазоров и легко разъединяется.

Полученные результаты подтверждают, что правильная предварительная калибровка параметров слайсера позволяет существенно снизить геометрические отклонения готовых изделий и повысить точность аддитивного производства методом SLS.

Список литературы

1. Peyre P., Rouchausse Y., Defauchy D., Régnier G. Experimental and numerical analysis of the selective laser sintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers // Journal of Materials Processing Technology. — 2015. — Vol. 225. — P. 326–336.
2. Rajesh R., Sudheer S.S., Mithun V.K. A review on selective laser sintering process // International Journal of Current Engineering and Scientific Research. — 2015. — Vol. 10, No. 10. — P. 1–8.
3. Mason J. Selective laser sintering of polymers: a review // United International Journal for Research & Technology. — 2020. — Vol. 12, No. 3. — P. 1–9.
4. Zhu H.H., Lu L., Fuh J.Y.H. Study on shrinkage behaviour of direct laser sintering metallic powder // Proc. IMechE Pt B: J. Eng. Manuf. — 2006. — Vol. 220. — P. 183–190.
5. SLS-оборудование для печати пластиком // ONSINT [Электронный ресурс]. — URL: <https://onsint.ru/sls-oborudovanie> (дата обращения: 27.05.2025).

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ GaSe МЕТОДОМ ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

ОНИЩЕНКО Н. И., ШЕМУХИН А. А.

Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Сарове

Аннотация. В работе проведен анализ спектров оптического поглощения кристаллов GaSe и облученных высокоэнергетическими электронами. Выполнено сравнение аппроксимации спектров по формуле Луковского соответствующей переходам «глубокий уровень – зона» и гауссовой разложения. Показано, что гауссова аппроксимация позволяет более точно воспроизводить форму спектров.

Ключевые слова: GaSe, оптическое поглощение, радиационные дефекты, гауссова аппроксимация, межзонные переходы.

1. Введение

Слоистый полупроводник GaSe представляет интерес для инфракрасной и терагерцовой оптики благодаря своим уникальным оптическим свойствам и чувствительности к дефектной структуре [1,2]. Облучение высокоэнергетическими электронами приводит к образованию радиационных дефектов, которые формируют дополнительные уровни в запрещенной зоне и проявляются в спектрах оптического поглощения.

В ранее опубликованной работе [3] спектры оптического поглощения облученного GaSe электронами с энергиями 9 МэВ аппроксимируются при помощи формулы Луковского (рис. 1):

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{A_1(\hbar\omega - E_{a1})^{1/2}}{(\hbar\omega)^3} + \frac{A_2(\hbar\omega - E_{a2})^{1/2}}{(\hbar\omega)^3} + A_3(\hbar\omega - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

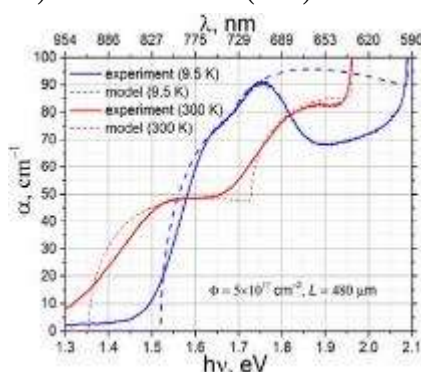


Рис. 1. Спектр оптического пропускания облученного GaSe (сплошная линия) и его аппроксимация формулой Луковского (пунктирная линия) при температурах 9,5 K (синий цвет) и температуре 300 K (красный цвет) [3]

Формула Луковского описывает сечение фотоионизации глубокого центра в приближении эффективной массы с учётом диэлектрического экранирования. Физические параметры A_i пропорциональны концентрации дефектов N_i и квадрату матричного элемента дипольного перехода, а E_a характеризуют термодинамические энергии ионизации уровней относительно края зоны. Модель применима, когда радиус локализации дефекта превышает постоянную решётки, а искажение кристаллической структуры вблизи центра пренебрежимо мало.

Как видно, аппроксимация формулой Луковского дает хорошее соответствие с экспериментом, однако имеются области существенного расхождения.

В связи с этим представляет интерес использование подхода, основанного на разложении спектров на сумму гауссовых функций, что позволяет более детально анализировать структуру спектра.

2. Методика исследования

В данной работе рассматривались спектры оптического пропускания, полученные в работе [3], для которых применялось разложение спектра на сумму гауссовых функций:

$$\alpha(\hbar\omega) = \sum_{j=1}^3 B_j \exp\left(-(\hbar\omega - E_j)^2 / c_j\right) + B_4 (\hbar\omega - E_{(-g)})^{1/2} \quad (2)$$

где B_1 – B_4 – константы, E_1 – E_3 – спектральные позиции максимальной интенсивности. Аппроксимация выполнялась методом наименьших квадратов. Каждая гауссова компонента может быть связана с отдельным оптическим переходом; эти переходы могут включать: переходы глубокий уровень – зона проводимости; переходы валентная зона – дефектный уровень; межзонные переходы.

3. Результаты

В данной работе были построены графики аппроксимации спектров оптического пропускания при помощи гауссиан (рис. 2). Полученные параметры подгонки приведены в таблице 1.

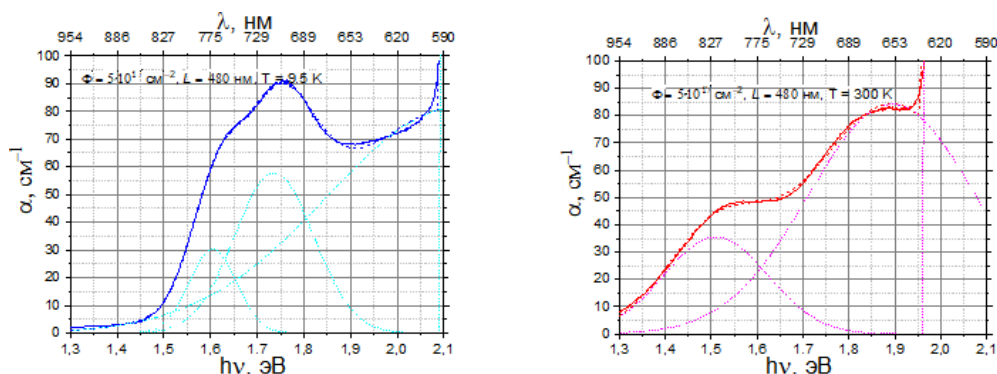


Рис. 2. Спектр оптического пропускания облученного GaSe (сплошная линия) и его аппроксимация гауссианами (пунктирная линия) при температурах 9,5 K (синий цвет) и температуре 300 K (красный цвет)

Таблица 1

Параметры подгонки, полученные при подгонке по уравнению (2) спектров оптического

поглощения облученного образца GaSe при температурах 9,5 и 300 К

Параметры	9,5 К	300 К
$B_1, \text{см}^{-1}$	30,17283	35,53749
$c_1, \text{эВ}^2$	0,00519	0,02543
$E_1, \text{эВ}$	1,60484	1,50997
$B_2, \text{см}^{-1}$	57,83449	84,2317
$c_2, \text{эВ}^2$	0,01436	0,06547
$E_2, \text{эВ}$	1,73616	1,89349
$B_3, \text{см}^{-1}$	81,52847	–
$c_3, \text{эВ}^2$	0,15817	–
$E_3, \text{эВ}$	2,13179	–
$B_4, \text{см}^{-1}$	1947	1947
$E_g, \text{эВ}$	2,09	1,96

Как видно из таблицы 1, энергия ионизации дефекта для полосы поглощения с меньшей энергией смещается в сторону меньших энергий фотона при повышении температуры, а интенсивность поглощения, наоборот, увеличивается. Таким образом, наблюдаемая более высокая интенсивность поглощения второй ступеньки при температуре $T = 9,5$ К на рисунке 2 объясняется вкладом первой полосы поглощения. Поскольку при повышении температуры происходит переход интенсивности поглощения из первой полосы поглощения во вторую, можно предположить участие дефекта множественного заряда.

Мы предполагаем, что это могут быть дефектные состояния, вызванные вакансиями Ga в двух зарядовых состояниях, имеющих энергетические положения на 0,23 и 0,61 эВ выше максимума валентной зоны при $T = 300$ К. Для подтверждения данной теории на следующем этапе исследования будет промоделирована зонная структура GaSe в программе Quantum Espresso.

4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что спектры поглощения GaSe не могут быть полностью описаны только переходами с участием отдельных глубоких уровней. Гауссова аппроксимация показывает, что спектр является результатом наложения нескольких процессов.

Получены энергии максимумов гауссиан, которые предположительно соответствуют межзонным переходам.

Таким образом, использование гауссового разложения позволяет дополнить физическую модель и получить более полное представление о механизмах оптического поглощения.

5. Список литературы

1. Gouskov A., Gamassel J., Gouskov L. Growth and characterization of III–V layered crystals like GaSe, GaTe, InSe, $\text{GaSe}_{1-x}\text{Te}_x$ and $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}$ // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 1982. – Vol. 5. – P. 323–413.
2. Sarkisov S.Y., Kosobutsky A.V., Shandakov S.D. Effect of van der Waals interactions on the structural and binding properties of GaSe // Journal of Solid State Chemistry. – 2015. – Vol. 232. – P. 67–72.
3. Bereznaya S. A., Redkin R. A., Brudnyi V. N., Sarkisov Y. S., Su X., Sarkisov S. Yu. Optical Absorption, Photocurrent Recombination Dynamics and Terahertz Dielectric Properties of Electron-Irradiated GaSe Crystals // Crystals. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. 1562. – DOI: 10.3390/cryst13111562.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО МОБИЛЬНОГО ПЕЛЕНГАТОРА

Орлов Д.П.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

АО «НИИ «Вектор»

Аннотация. В работе представлены результаты разработки устройства управления индивидуального мобильного пеленгатора на основе микроконтроллера ESP 8266. Рассмотрена возможность использования системы навигации и пеленгации по азимуту в устройстве ограниченного размера. На основе полученного прототипа сделаны выводы о перспективности миниатюризации и повышению автономности отдельных элементов пеленгатора.

Ключевые слова: Микроконтроллер, цифровая электроника, микроволновая электроника, пеленгация

Задача пеленгации радиосигнала является актуальной из-за необходимости обнаружения и определения направления источника радиоволн для спасательных, гражданских и исследовательских применений. К мобильным устройствам, работающим от аккумулятора, предъявляется требование к минимальному потреблению электроэнергии. Для устройств индивидуального использования необходим минимальный вес и наименьший используемый объем.

Главной проблемой устройства управления является собственное излучение, которое может создавать наводки на антенны и изменять азимут определенного источника. В данном проекте были использованы компоненты, обладающие минимальной достаточной мощностью для обеспечения работоспособности.

Таблица 1

Используемые компоненты

№ компонента	Модель	Функция
1	ESP 8266 D1 mini	Микроконтроллер
2	QMC5883P	Компас
3	ATGM336H	GPS модуль

Основой прототипа стал микроконтроллер ESP 8266 D1 Mini из-за его простоты, но при этом достаточного набора функций для приема и обработки сигналов с компаса и GPS модуля, а также дальнейшей передачи на устройство вывода. Среднее потребление в активном режиме составляет 60 мА, что является допустимым для прототипа, но возможно снижение за счет использования отдельного чипа STM 32 на печатной плате. В условиях комнаты с большим количеством электронных приборов погрешность в измерении компаса QMC5883P составляет 10°, в условиях открытой местности точность определения увеличивается до 2-3°. Используемый датчик GPS не имеет возможности определять расположение в помещении из-за необходимости в подключении как минимум к 4 спутникам, что для данного элемента возможно только при отсутствии массивных препятствий. При полевых испытаниях удалось установить связь с 17 спутниками, что дает возможность определять местоположение с точностью до 1-2 метров, а также получать информацию о скорости объекта с высокой точностью.

В ходе экспериментов выявлено, что достаточной для стабильной работы устройства управления является плата размером 60x45 мм, что входит в рамки обозначенного в техническом задании значения. При серийном производстве габариты устройства

управления можно снизить используя многослойные печатные платы, а также промышленные микроконтроллеры STM 32 или их аналоги.

Таким образом, можно сказать, что используемые компоненты подходят для использования в испытаниях, а также несерийного производства опытных образцов. Малая мощность элементов обеспечивает условие минимальных помех, а также высокой автономности, сохраняя воспроизводимость без использования сложных промышленных технологий.

Список литературы

1. Шалаев Н. А., Бегун П. И., Боронахин А. М. Система персональной навигации // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 10.
2. ESP8266 Technical Reference // Espressif Systems, 2024
3. ATGM336H GPS Module Datasheet // AXTek, 2024
4. Adafruit QMC5883P Library Documentation // Adafruit Industries, 2024.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ СФЕР ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ЗОНДОВ АСМ

ПАВЛОВ К.А., ГАГАРИНА А.Ю., СПИВАК Ю.М.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Аннотация. Разработан подход к созданию химически-селективных зондов атомно-силового микроскопа (АСМ) на основе пористых сферических частиц SiO_2 , синтезированных методом Штобера. Показано, что комбинация точно заданной сферической геометрии, пористой структуры и возможности пропитки кислотно-основными индикаторами позволяет преодолеть ограничения стандартных зондов и реализовать локальное картирование адгезионных центров поверхности с программируемой химической специфичностью. Синтез проведён в системе тетраэтоксисилан–вода–этанол–гидроксид аммония при объёмном соотношении 20:40:50:5 мл. По данным растровой электронной микроскопии (РЭМ) получены моодисперсные пористые сферы со средним диаметром 250–350 нм. Предложен и апробирован способ механического закрепления сфер на кантилере с помощью УФ-отверждаемого клея в условиях контролируемой манипуляции непосредственно в АСМ; корректность методики подтверждена РЭМ-изображением зонда с прикреплённой силикатной сферой диаметром 10 мкм.

Ключевые слова: метод Штобера, пористые сферы диоксида кремния, атомно-силовая микроскопия, модификация зондов, функционализация поверхности, кислотно-основные индикаторы, адсорбционные центры, адгезионная спектроскопия.

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) даёт уникальную возможность изучать физико-химические свойства поверхности с нанометровым разрешением. Одним из наиболее востребованных, но методически сложных направлений является картирование адгезионных центров – участков поверхности, обладающих специфическим сродством к функциональным группам. Такие измерения критически важны в физике полимеров, биосенсорике, катализе и коллоидной химии [1-4]. Принципиальная возможность локальной регистрации адсорбционных центров различной природы (кислотных и основных центров Льюиса и Бренстеда) может быть реализована методами АСМ при использовании зондов, модифицированных индикаторами – веществами с заданным значением показателя кислотности pK_a [5, 6]. Развитие этой концепции, названной

«активной метрикой», требует создания зондов, сочетающих химическую чувствительность с точно известной геометрией контакта.

Стандартные зонды с пирамидальной или конической формой острия имеют два существенных ограничения. Во-первых, фактически неконтролируемая площадь контакта не позволяет количественно интерпретировать силовые кривые; во-вторых, острие зонда АСМ в процессе сканирования может деградировать (затупляться), что так же приводит к невозможности контролировать площадь контакта зонда с поверхностью образца, тем самым снижая воспроизводимость измерений. Использование сферических наконечников известного радиуса снимает эти проблемы, сводя геометрию контакта к классической задаче сферы и плоскости [7, 8]. При этом для каждого типа образца требуются свои молекулы-индикаторы, а формирование монослоёв на острие сложно контролировать. Решением обеих проблем – геометрической и химической – может стать применение пористых сферических частиц, закрепляемых на свободном конце кантилевера. Пористая структура обеспечивает высокую удельную поверхность для адсорбции индикаторов, причём пропитку можно выполнять непосредственно перед экспериментом, адаптируя зонд к конкретному образцу. Прочная матрица оксида кремния устойчива к механическим нагрузкам в диапазоне, характерном для обычных измерений в прыжковой АСМ, а идеальная сферическая форма гарантирует корректность количественного анализа адгезионных сил.

Ключевой этап создания химически-селективного зонда – пропитка пористой оболочки индикаторными молекулами. В работе [1] для характеристики поверхности пористых материалов был успешно применён метод селективной адсорбции кислотно-основных индикаторов с разными значениями pK_a , позволяющий различать центры одной химической природы, но с различным распределением электронной плотности. Показано, что на поверхности SiO_2 преобладают брэнстедовские кислотные центры типа $\equiv Si-OH$ с $pK_a \approx 2,5$, способные избирательно связывать индикаторы. Следуя этому подходу, пористые сферы после закрепления на зонде выдерживают в растворе выбранного индикатора (например, м-нитроанилина для детектирования кислотных центров Льюиса или тимолового синего для основных центров). Благодаря развитой пористости молекулы индикатора равномерно распределяются по всему объёму сферы. Такая процедура выполняется непосредственно перед сканированием, обеспечивая свежесть и воспроизводимость функционального состояния зонда, что выгодно отличает её от попыток формирования монослоёв на острие.

Метод Штобера является хорошо отработанным способом получения монодисперсных сфер SiO_2 с регулируемой пористостью [5]. В его основе лежит гидролиз и поликонденсация тетраэтоксисилана в спиртово-водной аммиачной среде. В настоящей работе описан синтез пористых сфер SiO_2 по модифицированной рецептуре, исследование их морфологии методом РЭМ, а также методика закрепления сфер на стандартном АСМ-зонде и их последующая функционализация кислотно-основными индикаторами.

Материалы и методы

Синтез пористых сфер методом Штобера проводили при комнатной температуре. В колбе смешивали 50 мл этилового спирта (96%), 40 мл дистиллированной воды и 5 мл водного раствора гидроксида аммония (25% NH_3). После гомогенизации при интенсивном перемешивании (650 об/мин) по каплям добавляли 20 мл тетраэтоксисилана ($Si(OC_2H_5)_4$, 98%). Реакцию продолжали в течение 2 ч до появления устойчивой молочно-белой опалесценции. Полученную суспензию центрифугировали при 13000 об/мин в течение 5

минут, осадок трижды промывали дистиллированной водой и этанолом, высушивали при 250 °С (2ч) для избавления от гидроксида аммония.

Для осаждения сферической частицы использовали следующий подход [3,4,6]: на атомно-силовом микроскопе модели NTEGRA Prima на конец коммерческого бесконтактного кремниевого кантилевера HA-NC-b наносили микроскопическую каплю УФ-отверждаемого клея UV 50. Затем остриё подводили к предварительно выбранной и зафиксированной на подложке сфере полистирола, диаметром 10 мкм. Медленным сближением добивались контакта и проводили отверждение клея. Контроль результата осуществляли с помощью РЭМ Hitachi TM-1000. Для субмикронных сфер (250–350 нм) методика принципиально та же, но требует более высокой точности позиционирования. Прочность клеевого соединения (на разрыв порядка 10^7 Па) гарантирует устойчивость зонда при силах взаимодействия вплоть до 1 мкН, что с запасом перекрывает типичные нагрузки при наномеханических измерениях [3].

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено РЭМ-изображение, демонстрирующее образование отдельных сферических частиц с высокой степенью монодисперсности. Средний диаметр составил 300 ± 50 нм, что оптимально для АСМ-зондов: размеры много больше радиуса кривизны стандартного острия, но обеспечивают субмикронное латеральное разрешение. На рисунке 2 представлено РЭМ изображение зонда HA-NC с прикрепленной к нему полистироловой сферой, диаметром 10 мкм.

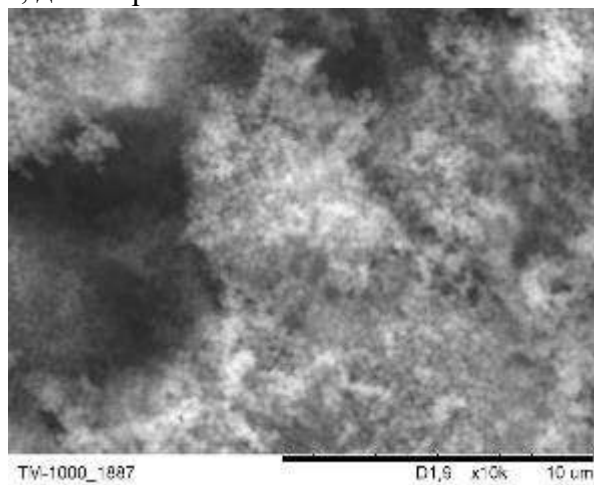


Рис. 1. – Сферы SiO_2 , полученные методом Штобера

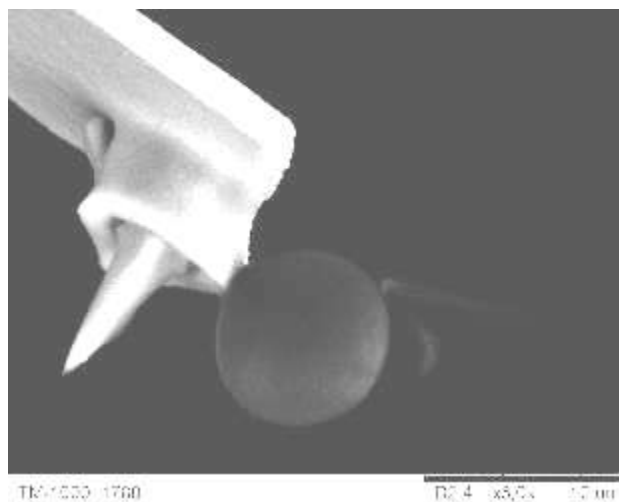


Рис. 2. – Полистироловая сфера на конце АСМ зонда НА-NC

Таким образом, в работе освоен и реализован синтез коллоидных частиц контролируемого размера в сочетании с методом модификации зондов АСМ. Предложенный подход является прямым развитием концепции «активной метрики» [2], в рамках которой АСМ-зонд перестаёт быть пассивным детектором рельефа и становится инструментом, активно участвующим в атомно-молекулярном дизайне и зондировании химических свойств поверхности.

Выводы

Разработан протокол синтеза монодисперсных пористых сфер SiO_2 по методу Штобера с контролируемым диаметром 250–350 нм. Воспроизведена и адаптирована методика механического закрепления сфер на кантилевер с использованием УФ-отверждаемого клея и микроманипуляции в АСМ; корректность подтверждена РЭМ. Продemonстрирована техника модификации зонда АСМ одиночной сферой (на примере полистироловой частицы диаметром 10 мкм), а также синтезированы пористые сферические частицы SiO_2 . С учётом известных данных о селективной адсорбции кислотно-основных индикаторов на поверхности SiO_2 [1] предложена концепция создания химически-чувствительного зонда: инкорпорирование индикаторов в пористые сферы позволит адаптировать зонд для решения задач по картированию адсорбционных центров с выбранным рКа. Такой зонд объединит точно заданную сферическую геометрию контакта, механическую стойкость и химическую избирательность, открывая путь к качественному и возможному количественному анализу локальных адгезионных и кислотно-основных свойств поверхности.

Список литературы

1. Spivak Yu.M., Myakin S.V., Moshnikov V.A., Panov M.F., Belorus A.O., Bobkov A.A. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions // Journal of Nanomaterials. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 2629582. – 8 p.
2. КИСЛОТНО-ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ Сычев М.М., Минакова Т.С., Слизов Ю.Г., Шилова О.А. Монография. Санкт-Петербург, Химиздат, 2016, 276с.
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДОВ ZNO , Fe_2O_3 И ZnFe_2O_4 НА ИХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПАРАМ ЭТАНОЛА Налимова С.С., Мошников В.А., Максимов А.И., Мякин С.В., Казанцева Н.Е. // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 8. С. 1022-1026.
4. ЭВОЛЮЦИЯ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РАЗМОЛА В АТТРИТОРЕ Пронин И.А., Якушова Н.Д., Сычев М.М.,

- Комолов А.С., Мякин С.В., Карманов А.А., Аверин И.А., Мошников В.А. // Физика и химия стекла. 2019. Т. 45. № 3. С. 274-287.
5. Спивак Ю.М. Атомно-молекулярный дизайн наноструктурированных материалов и наноконпозиций. Синтез, контроль технологии, свойства и применение : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Санкт-Петербург, 2022. – 32 с.
6. J. M. Spivak, A. Y. Gagarina, D. A. Kozodaev and V. A. Moshnikov, 3M-NANO Changchun. (2025) <https://doi.org/10.1109/3M-NANO65639.2025.11261172>
7. Анкудинов А.В. Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 297 с.
8. Няпшаев И.А., Анкудинов А.В., Стовпяга А.В., Трофимова Е.Ю., Еропкин М.Ю. Диагностика живых клеток в атомно-силовом микроскопе, используя субмикронный сферический зонд калиброванного радиуса кривизны // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 10. – С. 109–116.
9. Stöber W., Fink A., Bohn E. Controlled growth of monodisperse silica spheres in the micron size range // Journal of Colloid and Interface Science. – 1968. – Vol. 26, No. 1. – P. 62–69.
10. Анкудинов А.В., Быков В.А., Няпшаев И.А., Шубин А.Б., Сафронова О.В. Способ изготовления коллоидного зондового датчика для атомно-силового микроскопа // Патент РФ RU 2481590 C2. – Опубл. 10.05.2013. – 9 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ СОСТОЯНИЙ В МОП-СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ 4H-SiC/SiO₂

ПАЛАМАРЧУК М.О., АФАНАСЬЕВ А.В., ВОСКОЛОВИЧ А.В., ТЕРТЫШНАЯ Е.А.,
ЧИГИРЕВ Д.А., СЕРКОВ А.В.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Аннотация.

Методом емкостных измерений «низкая/высокая» частота исследована плотность интерфейсных состояний МОП-структуры на основе 4H-SiC/SiO₂. Плотность интерфейсных состояний рассчитывалась на основе разности емкостных характеристик, полученных из измерений на двух частотах: 1 кГц и 1 МГц. Показано, что D_{it} при приближении к дну зоны проводимости возрастает до 10^{12} эВ⁻¹·см⁻², что характерно для системы SiC/SiO₂. В виду проведения низкочастотных измерений на частоте 1 кГц получены несколько заниженные значения D_{it} . В то же время представленная методика оценки D_{it} может быть использована при анализе образцов, в которых ПЗД изготовлен разными технологиями.

Ключевые слова: карбид кремния, МОП-структура, интерфейсные состояния, D_{it} , $C-V$ – характеристики, подзатворный диэлектрик.

Карбид кремния (SiC), благодаря сочетанию высокой электрической прочности, высокой теплопроводности, химической и термической стабильности, в настоящее время является основным широкозонным полупроводником для создания интегрированных диодов с барьером Шоттки (SiC-JBS) и МОП – транзисторов (SiC-MOSFET) [1, 2]. При изготовлении SiC-MOSFET важной технологической операцией является формирование подзатворного диэлектрика (ПЗД). Классическим методом формирования ПЗД является метод термического окисления при температурах более 1150 °С в «сухом» кислороде или в присутствии азотсодержащих оксидов [3]. Формирование ПЗД этим методом неизменно приводит к высокой плотности состояний (D_{it}) на границе раздела 4H-SiC/SiO₂, связанных с кластерами углерода и около-интерфейсными ловушками [4]. Высокая плотность энергетических состояний, расположенных вблизи дна зоны проводимости 4H-SiC, обуславливает снижение подвижности носителей заряда в канале транзистора и

ухудшение рабочих характеристик прибора в целом [5]. В связи с этим характеристика интерфейса 4H-SiC/SiO₂ в части оценки плотности поверхностных состояний является важной задачей при отработке различных технологических приемов изготовления ПЗД SiC-MOSFET.

В данной работе плотность интерфейсных состояний в 4H-SiC/SiO₂-структурах оценивалась емкостным «низкочастотным/высокочастотным» методом (Hi-Lo) [6], который основан на измерении низкочастотных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ). Предполагается, что на высокой частоте D_{it} не успевают обмениваться зарядом с полупроводником и не вносят вклад в измеряемые емкостные характеристики, а на низкой частоте они участвуют в перераспределении заряда и увеличивают ёмкость структуры [6].

Объектом исследований в данной работе был SiC-МОП-конденсатор, выполненный на основе 4H-SiC - эписруктуры типа « $n - n^+$ ». Толщина эпислойа n -типа составляла 10 мкм, а концентрация нескомпенсированных доноров в нем – $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. ПЗД на основе SiO₂ толщиной 80 нм был получен методом сухого окисления ($T = 1150^\circ \text{C}$, время окисления – 9 ч.). На стороне n^+ - подложки после удаления SiO₂ были сформированы омические контакты. На завершающем этапе на поверхности ПЗД были сформированы алюминиевые электроды площадью $A = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Вольт-фарадные измерения SiC-МОП-структур были проведены с использованием тестера «Keysight B1505A» на частотах 1 кГц и 1 МГц в диа-пазоне напряжений $-9 \dots +9 \text{ В}$, обеспечивающих переход из режима глубокого обеднения в режим аккумуляции. Результаты измерения CV-характеристик структуры на высокой (1 МГц) и низкой (1 кГц) частотах, а также разность емкостей ($C_{LF} - C_{HF}$) на этих частотах приведены на рисунке 1.

Ёмкость интерфейсных состояний (1) рассчитывается разностью ёмкостей SiC на низкой и высокой частотах [1, 6]:

$$C_{it} = \frac{C_{ox} \cdot C_{LF}}{C_{ox} - C_{LF}} - \frac{C_{ox} \cdot C_{HF}}{C_{ox} - C_{HF}} \quad (1)$$

где $C_{ox} = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ пФ (см. рисунок 1)}$, C_{LF} – НЧ ёмкость на 1 кГц, C_{HF} – ВЧ ёмкость на 1 МГц.

Плотность интерфейсных состояний (2) рассчитывается через ёмкость интерфейсных состояний с учётом элементарного заряда и площади структуры:

$$D_{it} = \frac{C_{it}}{qA} = \frac{1}{qA} \left(\frac{C_{ox} C_{LF}}{C_{ox} - C_{LF}} - \frac{C_{ox} C_{HF}}{C_{ox} - C_{HF}} \right) \quad (2)$$

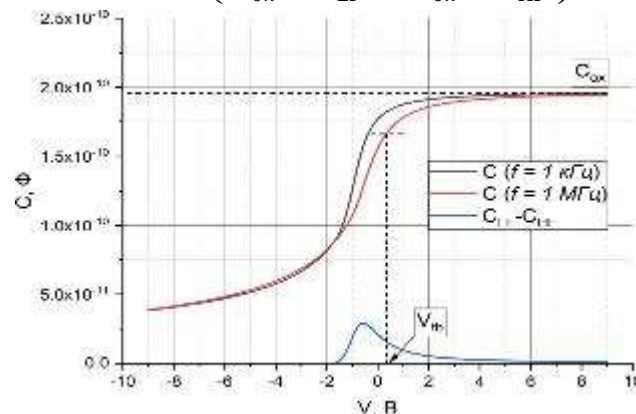


Рисунок 1 – CV-характеристики SiC/SiO₂-структуры: $C_{1\text{кГц}}$; $C_{1\text{МГц}}$; $(C_{1\text{кГц}} - C_{1\text{МГц}})$

Для получения зависимости плотности интерфейсных состояний от энергетического положения ловушек необходимо установить связь между подаваемым напряжением и поверхностным потенциалом ψ_s , характеризующим изгиб энергетических зон в приповерхностной области полупроводника. Расчет осуществлялся с использованием соотношения Берглунда (3), связывающего изменение поверхностного потенциала с измеряемой ёмкостью структуры [6]:

$$d\psi_s = \int_{V_{fb}}^{V_g} \left(1 - \frac{C_{LF}}{C_{LF}} \right) dV \quad (3)$$

где V_g – приложенное напряжение, V_{fb} – напряжение плоских зон (см. рисунок 1) [1].

Данное выражение позволяет определить зависимость $\psi_s(V_g)$ на основе экспериментальной ВФХ, учитывая перераспределение заряда в структуре при изменении напряжения.

Для перехода к энергетической шкале используется положение уровня Ферми в объёме полупроводника относительно дна зоны проводимости:

$$E_c - E_f = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right),$$

где N_c – плотность состояний в зоне проводимости/

С учётом изгиба зон у поверхности SiC энергетическое положение интерфейсных состояний относительно дна зоны проводимости определяется выражением

$$E_c - E_t = (E_c - E_f) - \psi_s.$$

Результаты расчётов SiC/SiO₂-структуры показывают ожидаемое увеличение плотности интерфейсных состояний от $3 \cdot 10^{11}$ до $1 \cdot 10^{12}$ эВ⁻¹·см⁻² при приближении к дну зоны проводимости (рисунок 2).

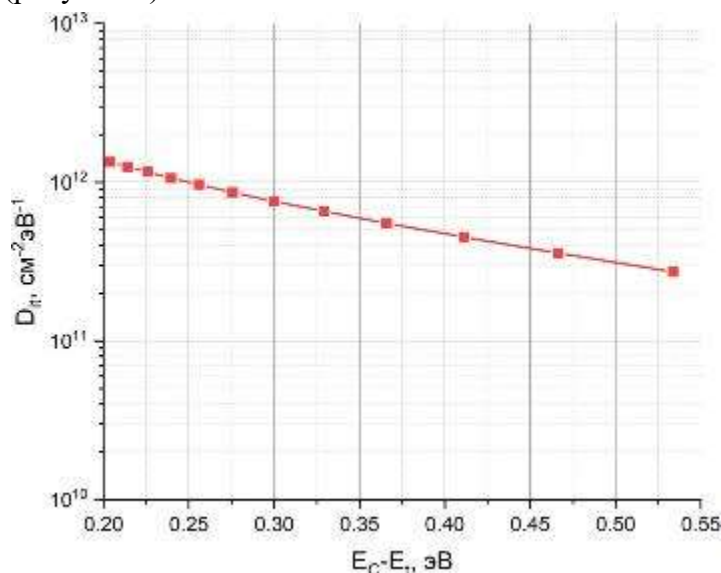


Рисунок 2 – Энергетическое распределение D_{it}

Таким образом, для SiC/SiO₂-структур Hi-Lo-методом получены количественная оценка плотности интерфейсных состояний и их энергетическое распределение. При этом следует учитывать, что в виду проведения низкочастотных измерений на частоте 1 кГц, а не в квазистатическом режиме (на частотах в единицы Гц), полученные результаты дают

несколько заниженные значения D_{it} . В то же время представленная методика расчёта может быть использована при анализе интерфейса SiC/SiO₂-структур для образцов, в которых ПЗД изготовлен разными технологиями.

Список литературы

1. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications. — Singapore: Wiley-IEEE Press, 2014. — 538 p.
2. Афанасьев А. В., Афанасьев П. В., Ильин В. А., Серков А. В., Трушлякова В. В., Чигирев Д. А., Шевченко С. А., Восколович А., Пологов С. А. Электрическая характеристика силовых карбидокремниевых MOSFET с линейным и гексагональным дизайном базовых ячеек // Известия вузов России. Радио-электроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 54–65.
3. Tailoring the 4H SiC/SiO₂ MOS-interface for SiC-based power switches / A. I. Mikhaylov, A. V. Afanasyev, V. V. Luchinin et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2016. Vol. 55, P. 08PC04.
4. R. Schörner, P. Friedrichs, D. Peters, and D. Stephani. IEEE Electron Device Let. 20, 241 (1999).
5. Михайлов А.И., Афанасьев А.В., Ильин В.А., Лучинин В.В., Решанов С.А., Schoner A. Метод увеличения подвижности носителей заряда в канале поле-вого 4H-SiC-транзистора // Физика и техника полупроводников. 2016, том 50, вып. 6, С.839 – 842.
6. Schroder D. K. Semiconductor Material and Device Characterization. — 3rd ed.— Hoboken: Wiley-Interscience, 2006. — 779 p.

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К УВЕЛИЧЕНИЮ АДГЕЗИИ МЕДНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ, К ПОЛИИМИДНЫМ ПОДЛОЖКАМ

Пилипчук А.В.¹ АФАНАСЬЕВА Е.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Национальный исследовательский университет ИТМО

Аннотация. Исследовано влияние предварительной обработки полиимидной подложки на адгезию медных структур, формируемых прямой лазерной металлизацией. Выполнено сравнение различных видов предварительной химической и физической обработки поверхности полиимидной подложки. Проведены эксперименты по изменению состава глубоко эвтектического раствора. Адгезия измерялась на лабораторном стенде, моделирующем метод нормального отрыва. Наибольший прирост прочности сцепления (10 кГ/см²) достигнут при комбинировании нескольких методов. Обсуждается влияние химической активации, создания каталитических центров и модификации рельефа.

Ключевые слова: глубоко эвтектический раствор, адгезия, полиимид, прямая лазерная металлизация, травление, наночастицы.

Введение. Активный процесс развития гибкой и носимой электроники создает потребность в недорогих, масштабируемых методах формирования проводящих структур различной топологии на поверхности полимеров различных видов. Прямая лазерная металлизация (ПЛМ) из глубоко эвтектических растворов (ГЭР) позволяет решить эту задачу, однако недостаточная адгезия покрытий ограничивает их применение. Причины слабого сцепления заключаются в инертности поверхности большинства полимеров, различии коэффициентов термического расширения и наличии остаточных напряжений. В предыдущих работах было показано, что адгезию можно повысить за счёт химического травления подложки в щелочном растворе [1], однако достигнутые значения всё ещё уступают требованиям промышленных стандартов.

Материалы и методы. Металлизацию осуществляли с помощью пикосекундного Nd:YVO₄-лазера (1064 нм, 7 пс, 80 МГц) с фокусировкой пятна ≈ 20 мкм.

В качестве прекурсора использовали ГЭР на основе хлорида холина, лимонной кислоты и ацетата меди(II) в молярном соотношении 1:1:1,25[2]. Подготовленный водный раствор в объёмном отношении 1:2 (ГЭР:вода) наносили центрифугированием на полиимидную подложку, высушивали 30 мин при 80 °С и облучали при мощности 140–160 мВт и скорости сканирования 7,5 мм/с. Непрореагировавший ГЭР удаляли промывкой в проточной воде, после чего выполняли химическое осаждение меди в течение 30 мин для уплотнения сформированного слоя.

Качество адгезии определяли лабораторной вариацией метода нормального отрыва (рисунок 1а). Изготовлен стенд, состоящий из системы блоков, нерастяжимой лески и ёмкости с набором мерных грузов. К контактной площадке площадью 9 мм² (рисунок 1б) припаивали гибкий проводник, второй конец через блоки соединяли с подвесом. Фиксировали критическую массу, при которой происходил отрыв, и результат пересчитывали в кг/см².

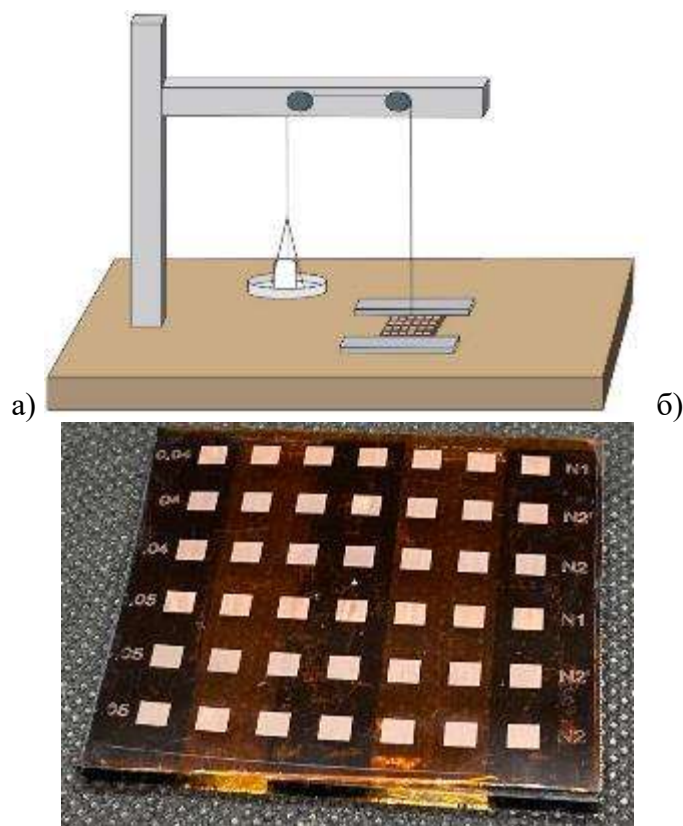


Рисунок 1. а) Модель лабораторного стенда для измерения адгезии, б) пример образца, использованного для исследования величины адгезии.

Экспериментальная часть. Предварительная обработка полиимидной подложки проводилась различными методами:

1. Химическое травление NaOH: подложку обрабатывали в 10%-м водном растворе NaOH при 80 °С в течении 30 минут, затем промывали 1%-м раствором HCl (5 мин, 30 °С), после осуществляли промывку деионизованной водой и сушку перед нанесением ГЭР;

2. Плазменная активация: подложка обрабатывалась коронным разрядом в течение 60 мин;

3. Добавление наночастиц CuO: в готовый раствор ГЭР добавляли коммерческие наночастицы оксида меди (средний размер 30–50 нм) в концентрации 20% от массы сухой части ГЭР, диспергировали ультразвуком;

4. Химическое травление в щелочном растворе NaOH и обработка водным раствором AgNO₃: подложку травлили в 20%-м водном растворе NaOH при 60 °С в течении 15 мин, затем подложка промывалась в проточной воде для удаления остатков щелочи и обрабатывалась 3%-м водным раствором нитрата серебра при комнатной температуре в течение 15 мин, затем осуществлялась промывка в деионизированной воде и высушивание для удаления остатков воды.

Результаты и их обсуждение. В работе рассматриваются различные технологии активации поверхности с последующей проверкой величины адгезии металла к полиимиду. Эталонном служили образцы, у которых активация производилась методом озонирования. У таких подложек среднее значение адгезии составило 0,96 кг/см². На рисунке 2 приведены сравнительные значения адгезионной прочности структуры металл-полимер для исследованных методов.

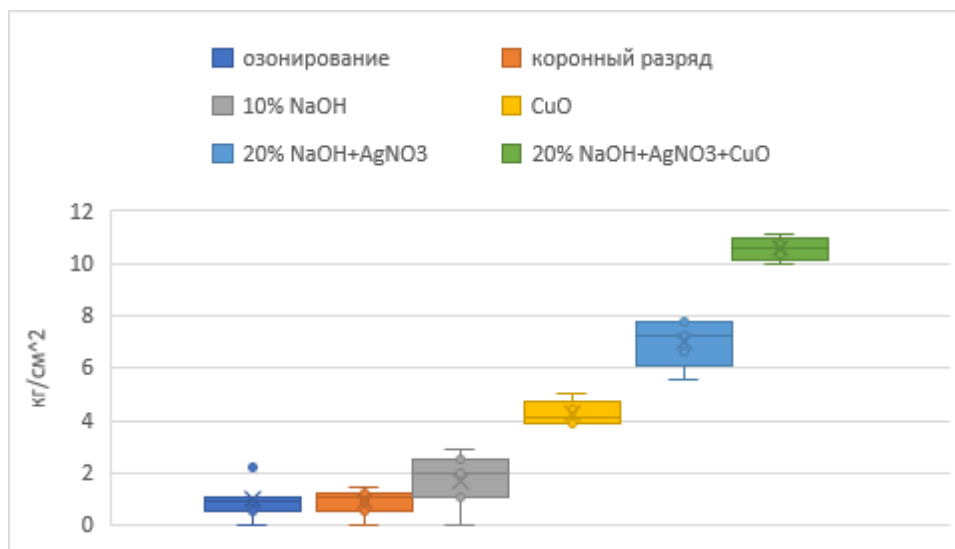


Рисунок 2. Относительное изменение адгезии при различных способах обработки полиимида и модификации ГЭР.

Обработка 10%-м NaOH, с последующей нейтрализацией щелочи раствором соляной кислоты увеличила прочность адгезионного взаимодействия до 1,71 кг/см², что на 76% лучше, чем эталонный образец. Объяснение заключается в механизме щелочного гидролиза полиимида. Под действием щелочи происходит разрыв циклической имидной группы –CO-NR-CO- с образованием полярных карбоксилатных –COO[–] и амидных –CONH₂ групп. Новые группы сильно повышают поверхностную энергию и смачиваемость полиимида. Также щелочной раствор растворяет поверхностные аморфные области полимера, что приводит к развитию рельефа поверхности.

Коронный разряд не обеспечил статистически значимого улучшения адгезии, хотя теоретически обработка плазмой должна была образовать достаточное количество карбоксильных и гидроксильных групп. Вероятно, выбранная мощность и время экспозиции оказались недостаточными для глубокой модификации химически стойкого полиимида.

Добавка наночастиц CuO в ГЭР привела к росту адгезии до 4,26 кг/см². Наночастицы играют роль зародышей, инициирующих гетерогенное восстановление меди из раствора непосредственно на стадии лазерного воздействия. Это локальное восстановление обеспечивает прочное адгезионное взаимодействие с полиимидной подложкой. Также восстановленные частицы меди, осаждаясь на полиимиде, создают шероховатость, которая увеличивает площадь контакта между растущей пленкой и полимером, что в свою очередь усиливает механическое сцепление. Наночастицы оксида меди в водном растворе ГЭР также увеличивают равномерность распространения энергии лазерного излучения в процессе индуцированного осаждения металла из раствора, что повышает однородность зародышеобразования. Это снижает энергию активации нуклеации и способствует формированию более сплошной и однородной металлической плёнки.

Обработка предварительно протравленной в водном растворе NaOH полиимидной плёнки в 3%-м растворе AgNO₃ вызвала дополнительный рост адгезии до 7 кг/см². Подобные результаты можно описать следующими механизмами: ионный обмен, катионы Na⁺ в поверхностном слое замещаются ионами Ag⁺, которые прочно удерживаются карбоксильными и гидроксильными группами, на поверхности формируются прочные хемосорбированные активные центры. При последующих операциях – воздействии энергии лазерного излучения, эти ионы восстанавливаются до металлических наночастиц серебра. Серебро, будучи катализатором, не только облегчает восстановление меди, но и формирует прочный переходный слой, в котором связь осуществляется через металлические контакты Ag–Cu и ионные связи с полимером.

Общие выводы. Максимальный уровень адгезии 10,5 кг/см² был достигнут в результате комбинации двух подходов: химического травления в растворе NaOH с последующей обработкой в растворе AgNO₃ и добавлением наночастиц оксида меди в глубоко эвтектический раствор. Эти результаты показывают, что уровень адгезии в системе медь–полиимид, формируемой методом прямой лазерной металлизации из растворов типа глубокой эвтектики, ограничивается прежде всего химической инертностью исходной поверхности полимера. Химическое травление и последующее модифицирование ионами серебра решает эту проблему, создавая реакционноспособный слой, который активно взаимодействует с прекурсором и способствует зародышеобразованию. Дополнительный выигрыш даёт введение в раствор ГЭР наночастиц CuO, что указывает на целесообразность комбинированных подходов ввиду зависимости уровня адгезии от различных физических и химических свойств материала подложки.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075–01438–22–07 (FSEE–2025–0009).

Список литературы

1. Logunov L., Afanaseva E., Pilipchuk A. Fabrication of Copper Electrodes by Direct Laser Metallization for Flexible Electronics // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, Suppl. 4. – P. S519–S522.
2. Shestakov D., Khairullina E., Shishov A. Deep eutectic solvents for laser-induced metallization of polymers // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 167. – Art. 109777.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Полидаускайте А.В., Ситков Н.О., Хмельницкий И.К.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Работа посвящена разработке высокочувствительных наноструктурированных покрытий для детектирования биологически значимых метаболитов (глюкоза, лактат) с использованием наноструктурированных покрытий на основе соединений переходных металлов. Рассмотрены методы синтеза оксида и гидроксида никеля, а также оксида хрома меди. Продемонстрирована возможность селективного определения целевых аналитов в присутствии мешающих компонентов в диапазоне миллимолярных концентраций. Полученные сенсоры перспективны для неинвазивной диагностики и экспресс-анализа биологических жидкостей.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия, метаболиты, переходные металлы, неферментативное детектирование, хроноамперометрия, циклическая вольтамперометрия, Nafion.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-79-10055, <https://rscf.ru/project/25-79-10055/>

Введение

Контроль уровня ключевых метаболитов, таких как лактат и глюкоза, является критически важным для своевременной диагностики метаболических нарушений, оценки эффективности физических нагрузок и мониторинга состояния пациентов в отделениях интенсивной терапии. Лактат служит маркером гипоксии и анаэробного метаболизма, а глюкоза – основным показателем углеводного обмена. Традиционные ферментативные биосенсоры, несмотря на высокую селективность, обладают ограниченной стабильностью, требуют строгих условий хранения и относительно дороги в производстве. В связи с этим активно развивается направление неферментативных электрохимических сенсоров на основе наноструктурированных оксидов и гидроксидов переходных металлов, которые способны непосредственно катализировать окисление органических молекул.

Особый интерес представляют материалы на основе никеля и хрома. Показано, что наноструктурированные NiO и Ni(OH)₂ в щелочной среде формируют обратимую редокс-пару Ni²⁺/Ni³⁺, которая эффективно окисляет лактат [1-3]. Оксид хрома Cr₂O₃, в свою очередь, демонстрирует каталитическую активность по отношению к глюкозе благодаря наличию смешанных валентных состояний хрома и развитой поверхности [5]. Использование ионообменных полимеров, в частности Nafion, позволяет одновременно решить несколько задач: прочно закрепить наночастицы на поверхности электрода, обеспечить механическую стабильность покрытия и повысить селективность за счёт электростатического отталкивания анионных интерферентов (аскорбат, урат) [4].

Технология формирования и исследование характеристик

Ni(OH)₂ получали прямым осаждением из раствора Ni(NO₃)₂·6H₂O с добавлением щёлочи с последующей промывкой и сушкой при 70–80 °С. Для получения NiO осадок прокаливали при 300 °С в муфельной печи. Наночастицы Cr₂O₃ синтезировали гидротермально из раствора Cr(NO₃)₃·9H₂O и мочевины с последующим отжигом при 200 °С. Все порошки перетирали до однородного состояния.

Модификацию коммерческих графитных углеродных электродов (SPCE) осуществляли методом капельного нанесения (drop-casting). Для этого 1 мг нанопорошка диспергировали в 1 мл 1% раствора Nafion (катионообменной мембраны) в этаноле, наносили на рабочую область электрода и высушивали при комнатной температуре. Nafion выполнял роль закрепляющей матрицы и селективного барьера.

Морфологию покрытий изучали на растровом электронном микроскопе путем их нанесения на кремниевые подложки. Электрохимические измерения проводили в трёхэлектродной системе с Ag/AgCl электродом сравнения при комнатной температуре. Циклическую вольтамперометрию (ЦВА) регистрировали в 0,1 М NaOH. Хроноамперометрию (ХА) выполняли при постоянном потенциале 0,5 В при последовательном добавлении стандартных растворов лактата кальция или глюкозы. Селективность оценивали добавлением аскорбиновой, мочевой кислот, а также CaCl_2 в физиологических концентрациях.

Результаты и их обсуждение

РЭМ-изображения продемонстрировали, что все наноструктуры на основе вышеперечисленных соединений формируют развитую однородную поверхность (рис. 1).

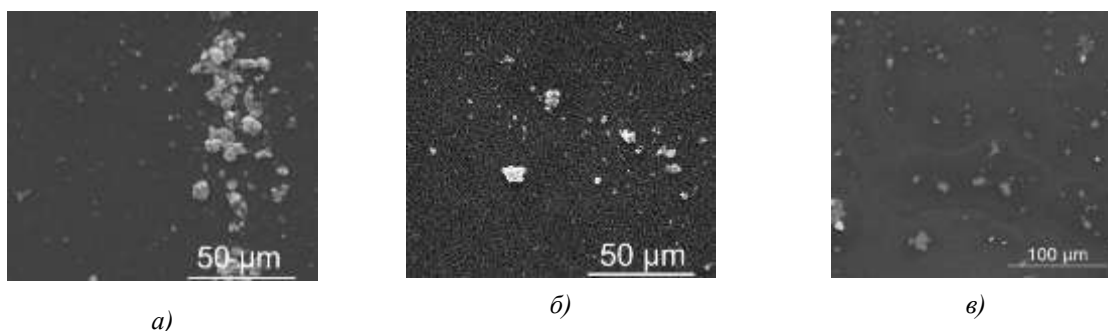


Рис. 1. РЭМ-изображения наноструктур: а) NiO ; б) Ni(OH)_2 ; в) Cr_2O_3

На циклической вольтамперометрии (ЦВА) покрытий характеризуется наличие пиков, свидетельствующих о протекании окислительно-восстановительной реакции (рис. 2). Для структур на основе оксидов металлов требовалась дополнительная активация путем добавления перекиси водорода.

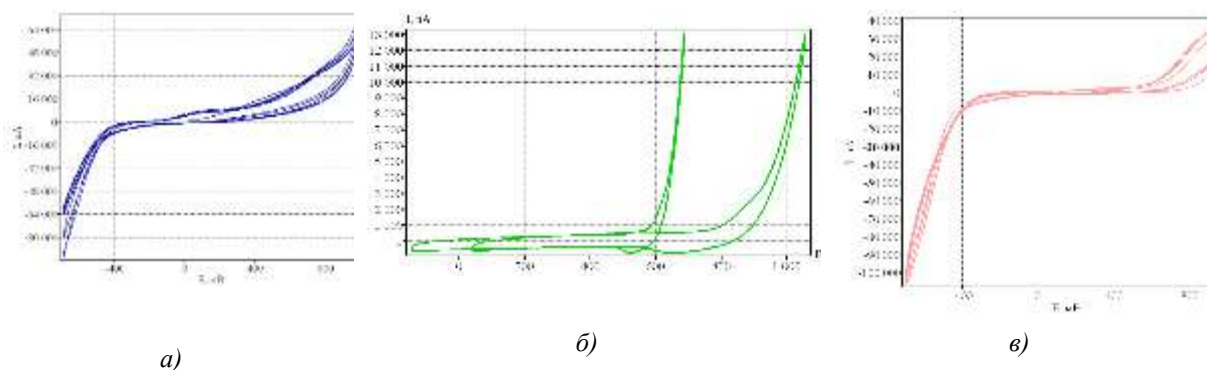


Рис. 2. ЦВА наноструктур: а) NiO ; б) Ni(OH)_2 ; в) Cr_2O_3

Хроноамперограммы (ХА) демонстрируют быстрый отклик на стационарное значение после каждого добавления метаболита (рис. 3).

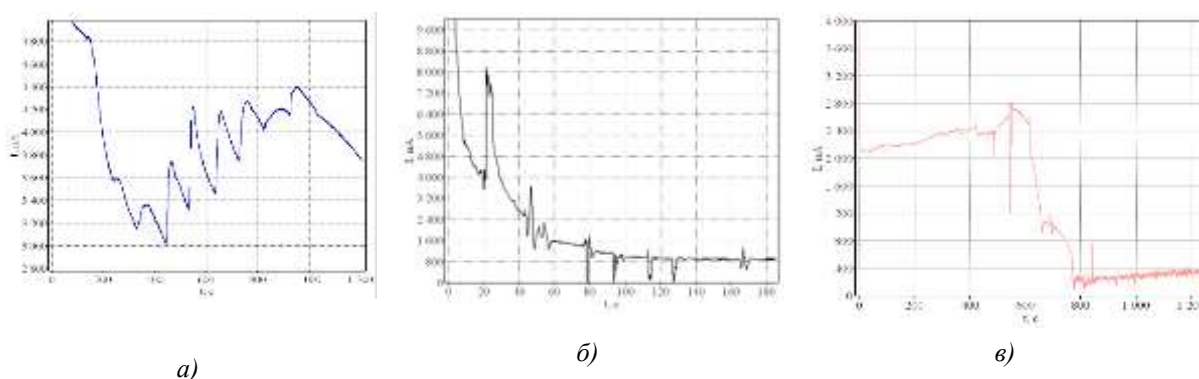


Рис. 3. ХА наноструктур: а) NiO; б) Ni(OH)₂; в) Cr₂O₃

Благодаря присутствию Nafion, содержащего отрицательно заряженные сульфогруппы, анионы интерферентов электростатически отталкиваются от поверхности электрода, поэтому добавление лактата и глюкозы характеризуется наличием соответствующих пиков на графиках (рис. 4). Таким образом, предложенные сенсоры обладают высокой селективностью и могут применяться для анализа сложных биологических проб.

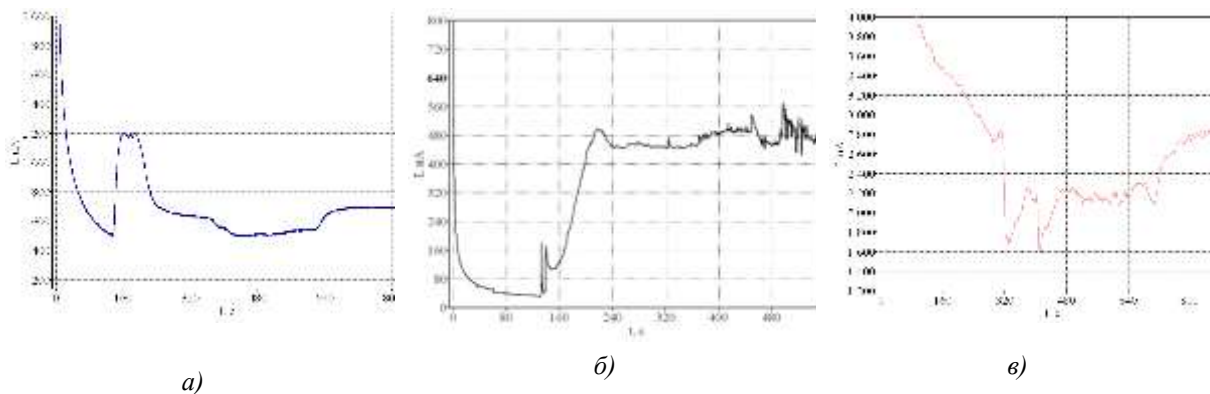


Рис. 4. Селективность наноструктур: а) NiO; б) Ni(OH)₂; в) Cr₂O₃

Список литературы

1. Kim S. et al., "Non-enzymatic electrochemical lactate sensing by NiO and Ni(OH)₂ electrodes: A mechanistic investigation": *Electrochimica Acta*, 2018, Vol. 276, pp. 240–246.
2. Kim S. et al., "Highly sensitive non-enzymatic lactate biosensor driven by porous nanostructured nickel oxide": *Ceramics International*, 2019, Vol. 45, No. 17, pp. 23370–23376.
3. Tsou K.-L. et al., "Inkjet-printed flexible non-enzymatic lactate sensor with high sensitivity and low interference using a stacked NiOx/NiOx-Nafion nanocomposite electrode with clinical blood test verification": *Talanta*, 2022, Vol. 249, pp. 123598.
4. Nasiri R. et al., "Electrochemical dual-sensing of lactate and glucose using NiO nanoparticles with cross-sensitivity calibration": *Talanta*, 2026, Vol. 297, No. Pt B, pp. 128678.
5. Panda R. et al., "Investigation on electrochemical properties of chromium oxide nanoparticles for non-enzymatic glucose sensing application": *Next Materials*, 2025, Vol. 8, pp. 100648.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ И СТМ ТОПОГРАФИИ РЕКОНСТРУКЦИЙ C(4x2) И P(2x2) ПОВЕРХНОСТЕЙ SI(100) И GE(100)

РЕМЕЛЕ В.Е., КУЗЬМИН М.В.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Аннотация. С помощью метода теории функционала плотности (DFT) с использованием функционала PBE и в рамках подхода Терсофа – Хамана были исследованы поверхности Si и Ge с реконструкциями p(2x2) и c(4x2). Анализ орбитально – спроецированной плотности состояний показал, что верхние атомы поверхностных димеров находятся в sp^3 – гибридованном объемноподобном состоянии, тогда как нижние – в конфигурации $sp^2 + p_z$ характерной для графеноподобных систем. Установлено, что именно различие в характере гибридизации и связанное с ним перераспределение зарядовой плотности определяют формирование асимметричных димеров. Показано, что изменение контраста изображения вследствие вариации тока согласуется с полученными результатами, а также с расчетами локальной плотности LDOS.

Ключевые слова: Кремний, германий, электронная структура, сканирующая туннельная микроскопия, теория функционала плотности

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) – это один из наиболее мощных методов исследования поверхности, ключевой особенностью которого является возможность получить изображение поверхности с атомным разрешением. Вместе с тем интерпретация экспериментальных СТМ – изображений сопряжена с рядом трудностей, наиболее важная из которых обусловлена неразрывной связью атомной и электронной структуры поверхности. Указанная взаимосвязь может быть прослежена путем варьирования напряжения смещения и величины туннельного тока в ходе измерений. Отдельные аспекты данной проблемы ранее рассматривались в работах [1, 2], в том числе авторами настоящего исследования [3].

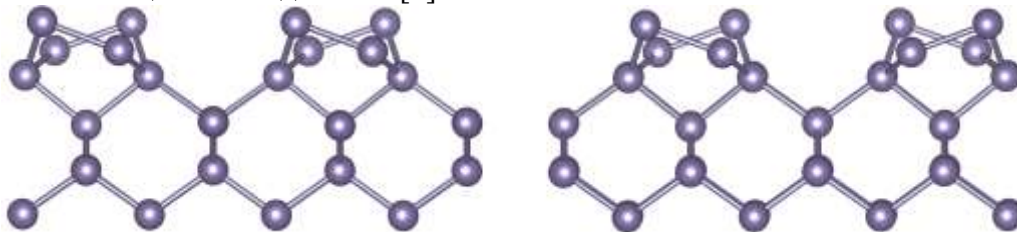


Рисунок 1. Атомные модели поверхностей Ge(001) p(2x2) (слева) и Si(001) c(4x2) (справа)

Представленная работа продолжает цикл публикаций, начатый в [4]. Если ранее основное внимание уделялось непосредственному влиянию параметров СТМ на наблюдаемое изображение, то целью данной публикации является анализ физических причин, определяющих характер формируемых СТМ – картин. Для ответа на поставленный вопрос был выполнен расчет локальной плотности состояний верхнего и нижнего атомов поверхностных димеров в проекции на атомные орбитали (рисунок 2), а также была проведена симуляция СТМ картин. Вычисления проводилось в рамках метода теории функционала плотности (DFT) с использованием обменно – корреляционного функционала PBE, ультрамягких псевдопотенциалов и базиса плоских волн. Значения энергии отсечки для волновой функции и электронной плотности в случае кремния составляли 46 и 221 Ry соответственно; для германия использовались значения 46 и 239. Расчеты для германия выполнялись на сетке k – точек $3 \times 6 \times 1$, а для кремния – $2 \times 4 \times 1$. В качестве модели поверхности использовалась суперячейка, состоящая из плиты (slab) толщиной 5 атомных слоев Si (Ge), нижняя поверхность которой была пассивирована

водородом, и вакуумного промежутка величиной 15Å. Исследуемые в работе реконструкции $p(2 \times 2)$ и $c(4 \times 2)$ поверхностей $\text{Si}(100)$ и $\text{Ge}(100)$ (рисунок 1) были получены путем геометрической оптимизации изначальной структуры поверхностей кремния и германия с применением алгоритма BFGS. Все СТМ – изображения рассчитывались в рамках подхода Терсофа – Хамана в программном пакете *critic2*.

На графике 2 представлена плотность состояний верхнего и нижнего атомов димера. Зеленым цветом показан суммарный вклад s , p_x и p_y – орбиталей, оранжевым – p_z – состояний. Видно, что для верхнего атома обе зависимости ведут себя достаточно согласованно. Напротив, в случае нижнего атома вклад s , p_x и p_y – состояний, хотя и демонстрирует определенную корреляцию с вкладом p_z , в целом с ним рассогласован. Данный результат позволяет предположить, что для верхнего атома реализуется sp^3 – гибридизация, характерная для объема, тогда как для нижнего атома реализуется конфигурация $sp^2 + p_z$, которая характерна для графеноподобных систем. Иными словами, верхний атом находится в объемоподобном состоянии, в то время как нижний – в поверхностноподобном. Этот факт обуславливает асимметрию, наблюдаемую для структур $p(2 \times 2)$ и $c(4 \times 2)$ как для германия, так и для кремния: верхний атом стремится занять положение, которое соответствовало бы его позиции в объемной решетке кристалла, что приводит к его «выталкиванию» из плоскости поверхности; нижний атом, напротив, «вдавливается» в поверхность, поскольку его электронная конфигурация тяготеет к плоской геометрии, характерной для графена. Как следствие, минимум энергии достигается в конфигурациях с наклонными димерами.

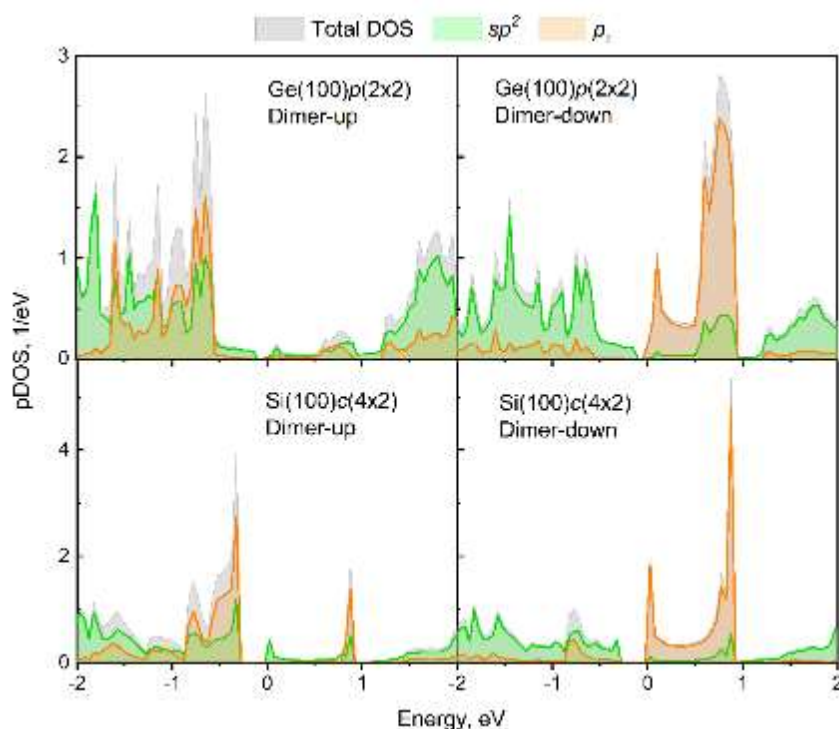


Рисунок 2. Зависимость плотности состояний проецированной на атомные орбитали ($pDOS$) от энергии для реконструкций $\text{Ge}(100)p(2 \times 2)$ и $\text{Si}(100)c(4 \times 2)$

Описанная выше асимметрия в расположении атомов и электронном строении закономерно проявляется и в распределении заряда. Как следует из графика 2, между верхним и нижним атомами димера происходит перераспределение зарядовой плотности: отрицательный заряд смещается к верхнему атому. Совокупность выявленных факторов – выталкивание верхнего атома в направлении наконечника иглы при одновременном

заглублении нижнего атома, смещение электронной плотности к верхнему атому и наличие относительно изолированного p_z – состояния – находит непосредственное отражение в СТМ – изображениях.

На рисунке 3 отчетливо видно, что для реконструкций Si(100) $c(4 \times 2)$ и Ge(100) $p(2 \times 2)$ при отрицательных напряжениях смещения верхний атом неизменно оказывается ярче нижнего. Этот результат хорошо коррелирует с наблюдаемой в области отрицательных смещений высокой плотностью состояний, которая, в свою очередь, обусловлена смещением электронной плотности на верхний атом. Дополнительный вклад вносит геометрический фактор – расстояние от иглы до верхнего атома меньше, чем до нижнего. Более сложная картина наблюдается для положительных напряжений смещения. В этих условиях нижний атом оказывается значительно ярче, и соответствующая интенсивность становится сопоставимой с интенсивностью от верхнего атома. Данное наблюдение объясняется тем, что при положительном смещении анализируется правая часть графика плотности состояний, где величина плотности состояний для нижнего атома существенно превышает соответствующую величину для верхнего. Это хорошо согласуется с наличием избыточного положительного заряда на нижнем атоме димера.

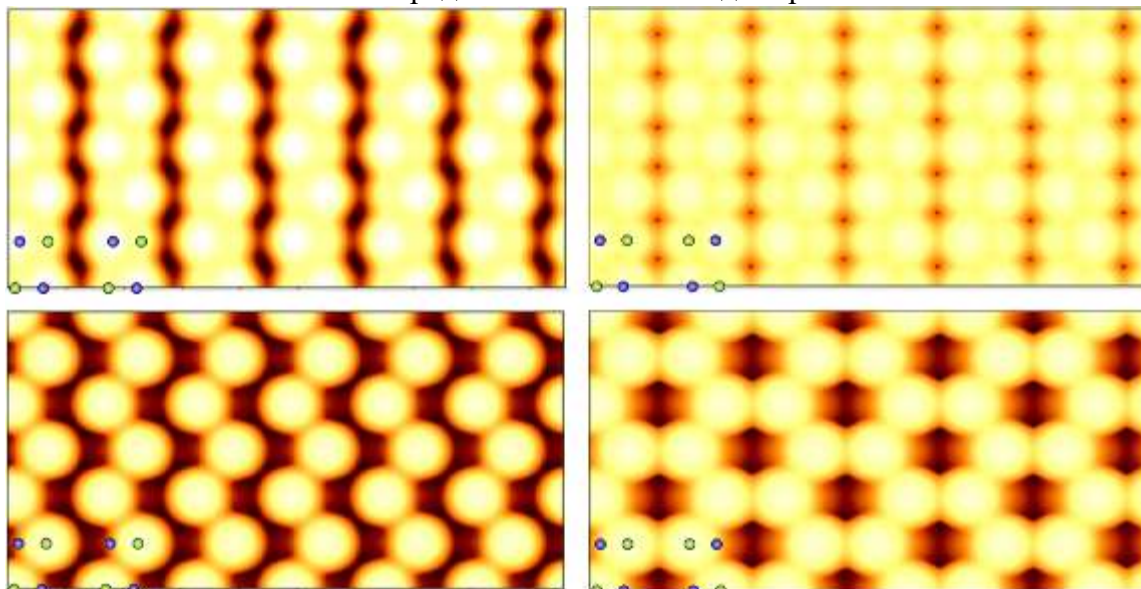


Рисунок 3. Симуляция СТМ картин для реконструкций Ge(100) $p(2 \times 2)$ (слева) и Si(100) $c(4 \times 2)$ (справа) для напряжений смещения +1V (сверху) и -1V (снизу).

Результаты, отмеченные в работе [4], а также данные, представленные в настоящей публикации, находят наглядное объяснение в пространственном распределении локальной плотности состояний (LDOS), которое приведено на рисунке 4. В частности, представленные тепловые карты LDOS объясняют изменение контраста, зафиксированное в [4], а их анализ позволяет интерпретировать и ряд других особенностей – например, наблюдаемое при вариации туннельного тока смещение особенностей изображения, которое также отражено в упомянутой работе.

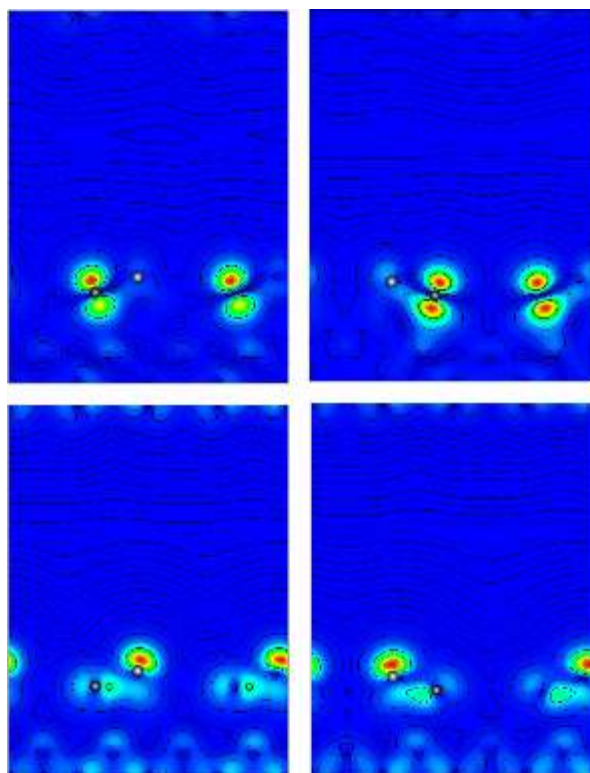


Рисунок 4. Распределение LDOS для реконструкций Ge(100)p(2x2) (слева) и Si(100) c(4x2) (справа) для напряжений смещения +1V (сверху) и -1V (снизу).

Список литературы

1. Saranin A.A., Zotov A.V., Ryzhkov S.V. Si(100)2x3-Na surface phase: Formation and atomic arrangement. *Physical Review B*, vol.58 №8 (1998)
2. Lehtio J.-P., Hadamek T., Kuzmin M., Laukkanen P., Demkov A.A. Evidence for the Eu 4f Character of Conduction-Band Edge at the Eu₂O₃ Surface Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy. *Surface Science*, 705 (2021)
3. Ремеле В.Е., Кузьмин М.В. Влияние электронной структуры на топографию поверхностей Ge(100) и Si(100) в сканирующей туннельной микроскопии
4. Ремеле В.Е., Кузьмин М.В. Влияние величины туннельного тока на изображения на изображения сканирующей туннельной микроскопии. *Наука настоящего и будущего*, 3 (2025)

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И РАБОТУ ВЫХОДА СЛОЁВ MoTe₂ И WSe₂ НА ПОДЛОЖКАХ Gr/SiC

РОДИОНЧИКОВА А.Д.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им.

В.И.Ульянова (Ленина)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Аннотация. Методами сканирующей зондовой микроскопии исследованы ван-дер-ваальсовы гетероструктуры на основе подложек графен/SiC с тонкими слоями MoTe₂ и WSe₂. Установлено, что работа выхода обоих материалов зависит от толщины слоя и с ростом числа слоёв выходит на насыщение, что соответствует переходу к свойствам объёмного материала. Для MoTe₂ работа выхода растёт с толщиной, для WSe₂ — убывает. В деформированных областях MoTe₂ (складках) обнаружена линейная зависимость поверхностного потенциала от величины деформации и определён

соответствующий деформационный потенциал. Полученные результаты демонстрируют возможность контролируемого изменения электронных свойств двумерных материалов путём изменения толщины и внесения механических напряжений, что важно для проектирования оптоэлектронных устройств на основе ван-дер-ваальсовых гетероструктур.

Ключевые слова: Кельвин-зонд микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия, ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, дихалькогениды переходных металлов, графен.

Введение

Двумерные (2D) материалы, такие как графен и дихалькогениды переходных металлов (ДХПМ), привлекают внимание исследователей благодаря возможности гибкого управления их электронными и оптическими свойствами [1]. Комбинируя различные слои посредством слабых ван-дер-ваальсовых взаимодействий, можно формировать гетероструктуры с заранее заданными характеристиками, что открывает путь к созданию новых оптоэлектронных устройств [2]. Монослои многих ДХПМ обладают прямой запрещённой зоной, в отличие от графена, что делает их особенно интересными для фотоприёмников и светоизлучающих приборов [3]. Среди наименее изученных представителей этого класса остаются MoTe_2 и WSe_2 , исследованные в данной работе. Ключевым параметром приборов является работа выхода, которая может существенно зависеть как от толщины слоя, так и от механических деформаций, возникающих, например, при переносе чешуек на подложку. В настоящей работе эти зависимости исследованы методом Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ) на примере чешуек MoTe_2 и WSe_2 , нанесённых на графен, выращенный на SiC.

Методика эксперимента

Подложка представляла собой однослойный графен, полученный методом высокотемпературного отжига грани Si-4H-SiC (Gr/SiC) [4]. Поверхность подложки содержала участки однослойного и двуслойного графена. Долю двуслойного графена (около 30%) контролировали методом регистрации фазы, который обладает более высоким пространственным разрешением по сравнению с КЗМ [5]. Чешуйки MoTe_2 и WSe_2 наносили на поверхность Gr/SiC методом механической эксфолиации. Все зондовые измерения проводились на микроскопе Ntegra Aura (ООО «НТ-МДТ», Россия). Топографию регистрировали в полуконтактном режиме, а поверхностный потенциал – двухпроходным методом Кельвин-зонд микроскопии. Работу выхода определяли, используя калибровочное измерение на пиролитическом графите HOPG.

Результаты и обсуждение

На основании измерений нескольких чешуек MoTe_2 и WSe_2 различной толщины были построены зависимости работы выхода от числа слоёв. Установлено, что для MoTe_2 работа выхода монотонно увеличивается, а для WSe_2 – уменьшается; в обоих случаях изменение составляет 40–50 мэВ (см. рис. 1). С дальнейшим ростом толщины работа выхода насыщается, приближаясь к величине, характерной для объёмных материалов. Такая зависимость качественно согласуется с данными, полученными методом теории функционала плотности (DFT) [6], что подтверждает достоверность применённой методики.

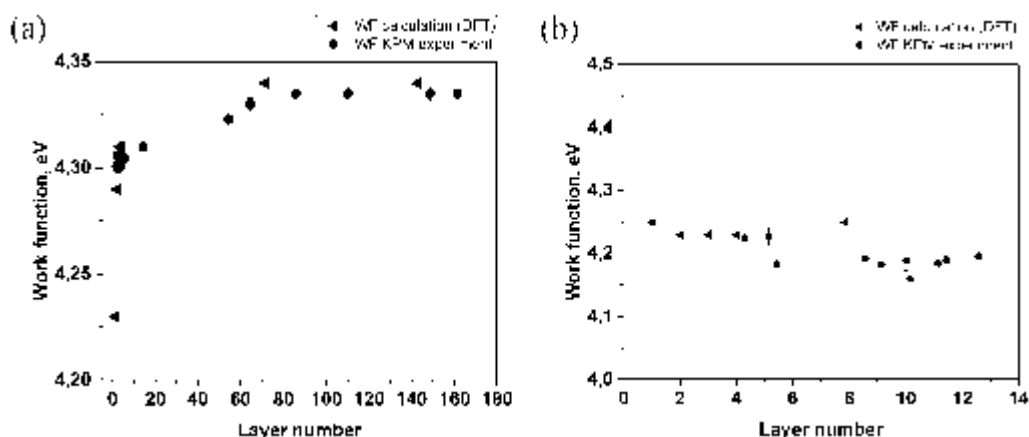


Рис. 1. Зависимость работы выхода от числа слоёв: (a) MoTe₂, (b) WSe₂. Чёрные квадраты – DFT-расчёт [6], красные – данные КЗМ.

На ряде перенесённых чешуек MoTe₂ наблюдались складки (wrinkles), представляющие собой участки изогнутого материала. Для количественной оценки деформации вершина складки аппроксимировалась полусферой, по геометрическим параметрам (высота и ширина) вычислялся радиус кривизны, а затем и степень деформации. Измерения показали, что поверхностный потенциал в области складок отличается от потенциала недеформированных участков и линейно растёт с увеличением деформации (рис. 2). Деформационный потенциал составляет приблизительно 40 мВ на 1 % деформации, что согласуется с известными данными для ДХПМ [7].

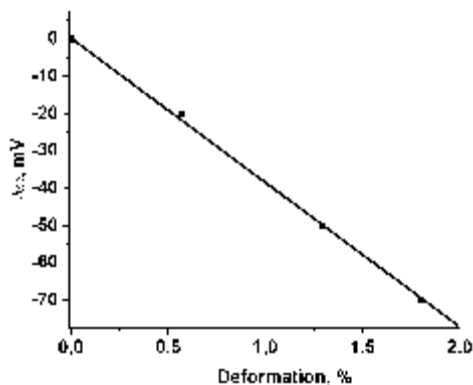


Рис. 2. Зависимость поверхностного потенциала складки MoTe₂ от деформации.

Таким образом, показано, что электронные свойства MoTe₂ и WSe₂ можно контролируемо изменять как путём выбора толщины слоя, так и посредством механических напряжений.

Заключение

Методом Кельвин-зонд микроскопии получены количественные зависимости работы выхода от толщины слоёв MoTe₂ и WSe₂ в ван-дер-ваальсовых гетероструктурах на графене. Экспериментально установлено, что работа выхода меняется на 40–50 мэВ и выходит на насыщение, причём для MoTe₂ она возрастает, а для WSe₂ уменьшается. Обнаружена линейная связь между механической деформацией в складках MoTe₂ и изменением поверхностного потенциала. Оценка деформационного потенциала составила ~40 мВ на 1%. Полученные результаты демонстрируют возможность управления электронными свойствами

тонких слоёв ДХПМ путём изменения толщины и внесения механических деформаций, что важно для создания оптоэлектронных устройств на основе ван-дер-ваальсовых гетероструктур.

Список литературы

1. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene //Nature materials. – 2007. – Т. 6. – №. 3. – С. 183-191.
2. Geim A. K., Grigorieva I. V. Van der Waals heterostructures //Nature. – 2013. – Т. 499. – №. 7459. – С. 419-425.
3. Li C. et al. Engineering graphene and TMDs based van der Waals heterostructures for photovoltaic and photoelectrochemical solar energy conversion //Chemical Society Reviews. – 2018. – Т. 47. – №. 13. – С. 4981-5037.
4. Lebedev A. A. et al. High Quality Graphene Grown by Sublimation on 4 H-SiC (0001) //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 14. – С. 1882-1885.
5. Родиончикова А. Д. и др. Метод регистрации фазы для визуализации однослойного и двуслойного графена на поверхности SiC //Письма в Журнал технической физики. – 2026. – Т. 52. – №. 6. – С. 18-21.
6. Kim H., Choi H. J. Thickness dependence of work function, ionization energy, and electron affinity of Mo and W dichalcogenides from DFT and GW calculations //Physical review B. – 2021. – Т. 103. – №. 8. – С. 085404.
7. Yu Y. et al. Strain-induced indirect-to-direct bandgap transition, photoluminescence enhancement, and linewidth reduction in bilayer MoTe2 //ACS nano. – 2023. – Т. 17. – №. 5. – С. 4230-4238.

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ SPI-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КМОП-ФОТОПРИЁМНИКОВ

РОМАНОВ А.Ю

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В работе рассматривается проблема верификации сложно-функциональных блоков интегральных схем при проектировании в системах автоматизированного проектирования (САПР). Разработана тестовая среда, на основе универсальной методологии верификации (UVM) применительно к SPI-интерфейсу. Продемонстрированы результаты верификации разработанных блоков, как на схемотехническом уровне, так и на уровне разведенной топологии. Продемонстрировано, что верификация позволяет сэкономить компании финансовые ресурсы. Практическая значимость работы заключается в возможности простой модификации тестового окружения под измененные требования технического задания.

Ключевые слова: SPI-интерфейс, UVM, Верификация, КМОП-фотоприемник, Тестовая среда

Введение

Современный этап проектирования интегральных схем в САПР включает не только синтез, но и функциональную проверку работоспособности устройства, включая учёт влияния температурных отклонений и технологического разброса параметров. Для минимизации рисков нарушения сроков поставок и дополнительных финансовых вложений в повторный запуск производства чипов, верификацию выделяют в самостоятельное направление. Ключевая задача – проведение проверок по сценариям, имитирующим реальную эксплуатацию устройства и выявление ошибок аналого-цифровых схем, поэтому верификацию следует рассматривать как обязательный этап при проектировании, а не как вспомогательную проверку

В [1] показано, что качество работы КМОП-фотоприемника напрямую зависит от корректной настройки следующих параметров: коэффициента усиления, режима с размерами окна считывания, управляющих напряжений и тестовых сигналов. Осуществляя отправку упомянутых сигналов, SPI-интерфейс служит критически важным функциональным узлом управления фотоприемного устройства [2].

Последовательный периферийный интерфейс состоит из ведущего модуля и периферийных регистров памяти (рисунок 2).

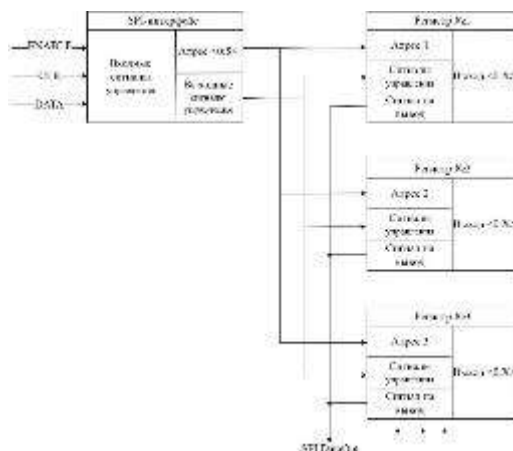


Рис. 2. Архитектура SPI-интерфейса

Ведущий модуль осуществляет обработку входных управляющих сигналов для формирования командных последовательностей периферийным устройствам. С целью корректной передачи данных, сигнал разрешения ENABLE рекомендуется формировать за полтакта CLK. После завершения транзакции сигнал разрешения принимает низкий логический уровень через полтакта после среза CLK.

Подходы к разработке тестовой среды

Для безошибочной работы фотоприемного устройства (ФПУ) SPI-интерфейс должен быть охвачен полноценной функциональной верификацией. Разработка тестовой среды ведётся по универсальной методологии UVM, позволяющей разделить генерацию управляющих сигналов, мониторинг воздействия, проверку результатов [3]. В исследуемом интерфейсе техническое задание предполагает ввод адреса, длины регистра и перечисление данных с указанием типа транзакции. Операция записи осуществляется по восходящему фронту тактового сигнала, чтение - по срезу. Отправляемый пакет с данными включает бит, определяющий тип транзакции: 0 - запись, 1 – чтение далее следует 6 битный адрес и записываемые данные. Оптимальным вариантом является направленный принцип тестирования с использованием конструкций утверждений языка SystemVerilog для проверки корректности вводимых разработчиком параметров, как это продемонстрировано в таблице 1 в фрагментах кода тестбенча.

Таблица 1

Фрагменты кода на SystemVerilog для UVM-ориентированного тестовой среды

<pre> spi_start(); for (int i = frame_w-1; i >= 0; i--) begin @(negedge SPI_CLK_OUT); if (i >= width) SPI_D_OUT = frame[i]; @(posedge SPI_CLK_OUT); if (i < width) read_data[i] = SPI_D_IN; end #(2*CLK_HALF); </pre>	<pre> for (int r = 0; r < reg_count; r++) begin assert(addr[r] <= 0 addr[r] >= 63) \$fatal(1, "***** addrs[%0d]=%0d forbidden! Only include range 1..63 *****", r, addr[r]) assert(width[r] < 1 width[r] > MAX_WIDTH) \$fatal(1, "***** widths[%0d]=%0d out of range! Correct width data include range 1..%0d ***** ", r, width[r], MAX_WIDTH); </pre>
--	--

<pre> SPI_EN_OUT = 0; total++; if (got === expected) begin pass++; \$display("> PASS: read_data = %0d ", read_data); end else begin fail++; \$display("> FAIL: expected=%0d got=%0d", data, read_data); end end endtask </pre>	<pre> assert(data[r] < 0 data[r] >= (1 << width[r])) \$fatal(1, "***** datas[%0d]=%0d overflow! Max=%0d for %0d-bit or Change widths[%0d] *****", r, data[r], (1<<width[r])-1, width[r], r); end </pre>
--	--

Для апробации разработанной тестовой среды была проведена верификация на базе двух виртуальных функциональных моделей регистров разрядностью 10 и 14 бит с адресами 23 и 54 соответственно. Выбор двух регистров обусловлен необходимостью проверки корректности передачи данных различной длины. На рисунке 3 представлена структурная схема подключения разработанного тестбенча к интерфейсу SPI, взаимодействующему с ведомыми регистрами памяти. Особенностью данной проверки является то, что исследуемые схемы представлены на двух уровнях абстракции: схемотехническом – реализация на основе стандартных логических примитивов из библиотеки разработчика САПР и топологическом – верификация на основе экстрагированных параметров разведенной топологии.

Проведено тестирование всевозможных комбинаций доступных данных для записи в регистры. На примере записываемых данных в 14 разрядный регистр числа 153 проанализируем тактовые диаграммы тестбенча и убедимся в корректности результатов.

На рисунке 4, первый бит, определяющий тип транзакции подчеркнут, жирным шрифтом выделен адрес и далее следует записываемая информация в двоичной системе счисления. DATA, EN, CLK являются генерируемыми сигналами с тестбенча, SPI_EN, SPI_CLK, SPI_RW – внутренние сигналы интерфейса, SPI_DIN – записываемые данные в регистр. SPI_DOUT – шина, ведущая к тестирующему блоку для сравнения данных при считывании. Out54 шина, с которой можно считать значение по умолчанию (всегда значение 63 до операции записи), либо записанную информацию. Для наглядности в консоль вывода логов указывается номер регистра, с которым проводится транзакция, указанный пользователем адрес с данными для записи и тип проводимой операции. В конце указывается статус с отметкой успешности проведения записи и считывания при совпадении результата.

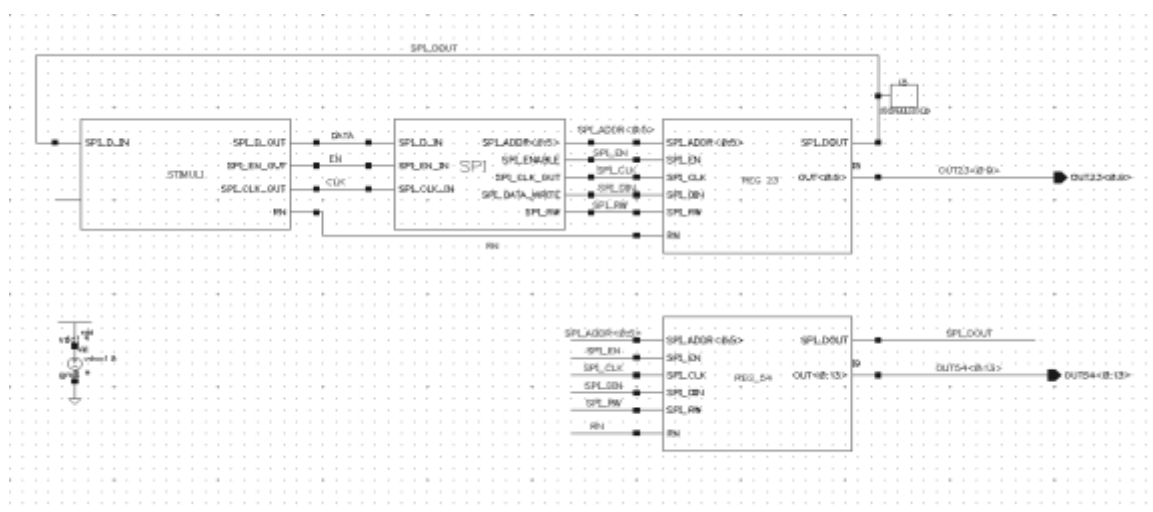


Рис. 3. Тестовый модуль с подключением к SPI-интерфейсу

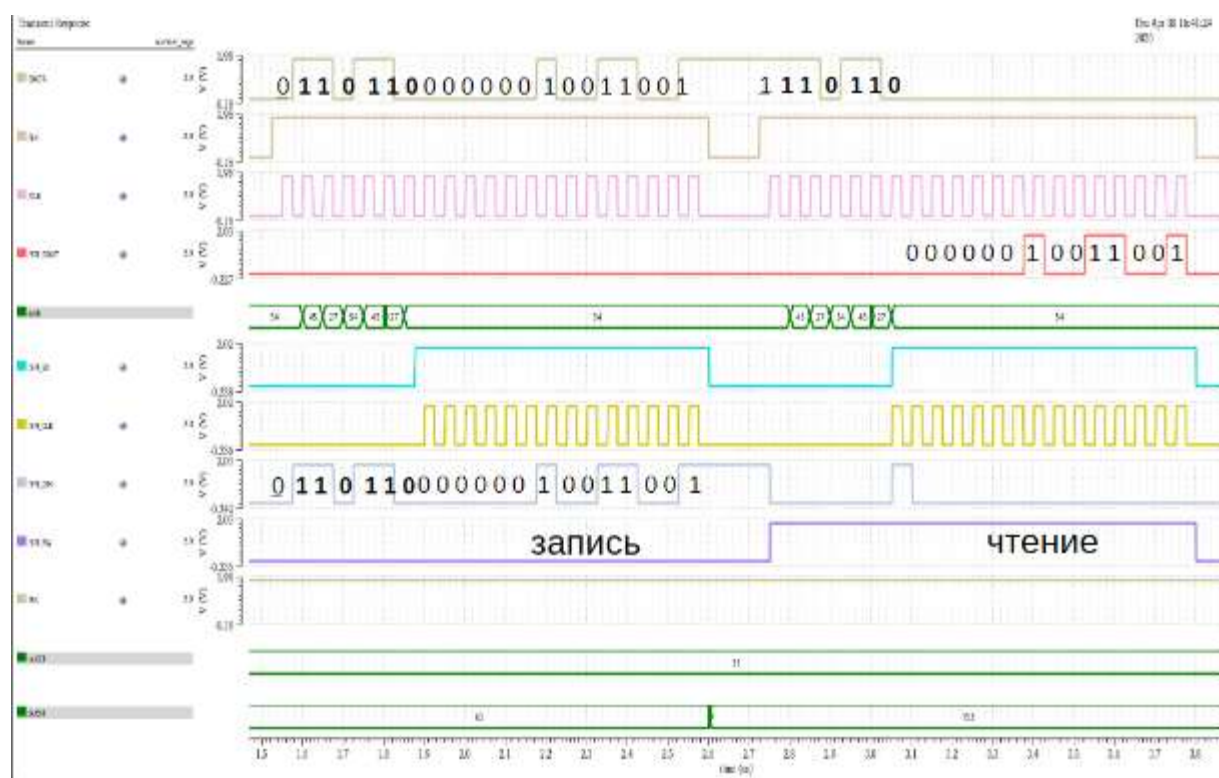


Рис. 4. Запись и чтение для 14-разрядного регистра с адресом 54 и данными 153

Записанная информация 153 (00 0000 1001 1001) SPI_DIN совпадает с прочитанной с шины SPI_DOUT.

Выводы

Главным преимуществом верификации является функциональная проверка схем до этапа передачи в производство. Полное исключение повторного запуска кристаллов на фабрике обеспечивает существенный экономический эффект, сокращая финансовые и временные затраты на реализацию проекта.

Практическая ценность работы заключается в простой корректировке разработанного тестового окружения под новые фотоприемные устройства с иными параметрами записи и чтения.

Дополнительным преимуществом тестовых сред является возможность их интеграции с ПЛИС для верификации уже выпущенных кристаллов. Это позволяет проводить выходной контроль и гарантировать передачу заказчику полностью исправных устройств.

Список литературы

1. Gao Z., Yang C., Xu J., Nie K. A Dynamic Range Enhanced Readout Technique with a Two-Step TDC for High Speed Linear CMOS Image Sensors // Sensors. 2015. Т. 15. № 11. С. 28224-28243
2. Chen X., Yang H. Binary Image Acquisition Method of CMOS Image Sensor Based on MCU SPI Interface // 2015 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP). : IEEE, 2015. С. 130-133.
3. Sahay N., Gajjar S. Design and UVM based Verification of UART, SPI, and I 2 C Protocols //2024 5th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). – IEEE, 2024. – С. 330-335.

АКУСТОФЛЮИДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА КЛЕТОК КРОВИ

Рузин Д. И., Краснокутский Д. С., Дорошенко С.В., Лемозерский В. Е.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого

Аннотация. Исследована технология и конструкция акустофлюидной системы для экспресс-анализа крови при диагностике лимфомы. Система реализована на основе пьезоэлектрической пластины из ниобата лития и содержит расположенные на ее поверхности парные встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Исследованы два варианта устройств: с одним каскадом ВШП и двумя последовательными каскадами ВШП. Испытания систем проведены на моделях с применением клеток *Saccharomyces cerevisiae* и образцов крови. Для повышения селективности системы разработаны топологии микрофлюидных каналов, которые присоединяли к пластине ниобата лития с помощью адгезионно активного звукопроводящего материала.

Ключевые слова: акустофлюидные системы, анализ клеток крови, пьезоэлектрические материалы, поверхностные акустические волны, диагностика лейкоза

Применение явления поверхностных акустических волн (ПАВ) в пьезоэлектрических материалах для манипулирования частицами в суспензии позволило развиваться новой области биомедицинской аналитики – акустофлюидике (АФЛ). АФЛ позволяет манипулировать клетками в жидкой среде бесконтактным способом с помощью моделирования акустических сил заданной конфигурации.

Слияние направлений ПАВ и микрофлюидики позволило далее усовершенствовать этот метод повысив селективность сепарации клеток и частиц, возможность осуществлять непрерывный анализ и дозирование, а также сформировать аналитические устройства для применения в медицинской практике [1-3].

В данной работе рассматриваются пути повышения разрешения при сепарации клеток крови для проведения диагностики лимфом. Лимфома представляет собой обширную группу гематологических злокачественных заболеваний, затрагивающих лимфатическую ткань. При лимфоме наблюдается неконтролируемое накопление атипичных лимфоцитов, что ведет к увеличению лимфатических узлов и поражению различных органов.. В клинической практике лимфомы классифицируются на два основных типа: лимфома

Ходжкина (ранее известная как лимфогранулематоз) и неходжкинские лимфомы. На рис. 1 представлена статистика по онкологическим заболеваниям в РФ [2].



Рис. 1 Первичная заболеваемость злокачественными новообразованиями в РФ [4]

Для реализации микросистем с инженерной точки зрения необходимо понимать морфологические, физические и механические особенности патогенных клеток при лимфоме. Отличие здоровых и опухолевых клеток представлено в табл. 1 [5].

Таблица 1

Некоторые форменные элементы нормальной крови и крови пораженной лимфомой.

Элемент	Размеры	Примечание
“Здоровая” кровь		
Эритроциты	6-8 мкм	Основные переносчики кислорода
Лимфоциты	6-12 мкм	Участие в иммунной реакции
Кровь больного лимфомой		
В-клеточные лимфомы (лимфобластные; центробластные; плазмабласты)	10-40 мкм	Крайне агрессивны, быстро растут
Т-клеточные лимфомы	7-20 мкм	

Как видно из таблиц опухолевые клетки имеют серьезные отличия по размеру по сравнению со здоровыми, что может быть использовано для реализации микросистем по выделению и анализу таких клеток.

Акустофлюидные технологии открывают новые возможности для высокоточной, непрерывной и биосовместимой сепарации клеточных компонентов крови. На рис. 2 представлена схема и общий вид экспериментальной установки.

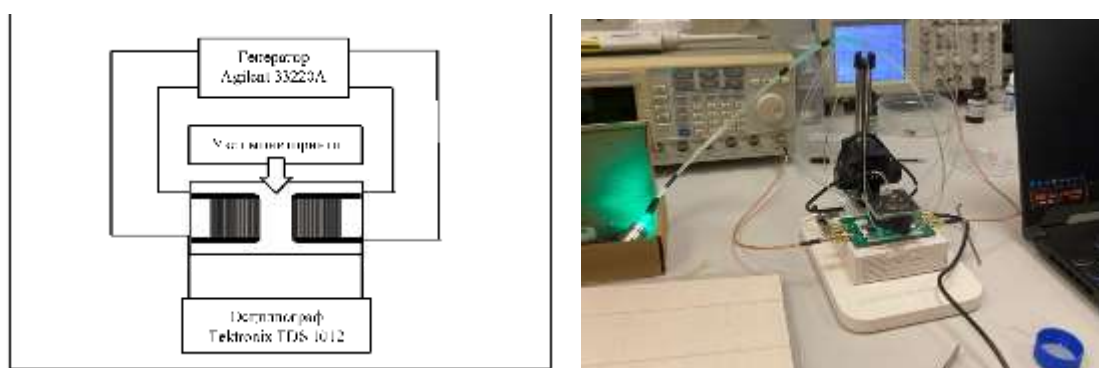


Рис. 2 Схема и фотография экспериментальной установки.

На рис. 3 показан общий вид электроакустического актюатора.

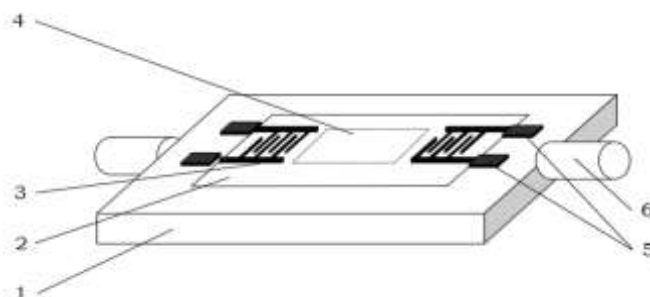


Рис. 3 Общий вид электроакустического актюатора: 1 – подложка в виде печатной платы, 2 – пьезоэлектрический кристалл, 3 – ВШП, 4 – рабочая область, 5 – контактные площадки, 6 – разъемы



Рис. 4 Акустофлюидная система с двумя ступенями

В данной работе был разработан и реализован электроакустический модуль в виде печатной платы, в которую вклеивается пьезоэлектрический кристалл ниобата лития 128° YX-LiNbO₃ (обладающий рядом преимуществ: доступность, высокое значение коэффициента электромеханической связи и подходящее значение скорости распространения акустических волн) со сформированными встречно-штыревыми преобразователями из алюминия (толщиной в 10 мкм, напыление материала осуществлялось методом EBPVD, необходимый рисунок был сформирован методом стандартной фотолитографии).

Для реализации двухступенчатой сепарации патогенных клеток необходимо сформировать две пары встречно-штыревых преобразователей или одну пару, но с перестраиваемой частотой. В таком случае пары должны отличаться предполагаемой частотой (длиной возбуждаемой волны) для оказания различного акустического воздействия на фракции клеток. Это может быть использовано для выделения частиц/клеток в сложных, многосоставных коллоидных жидкостях.

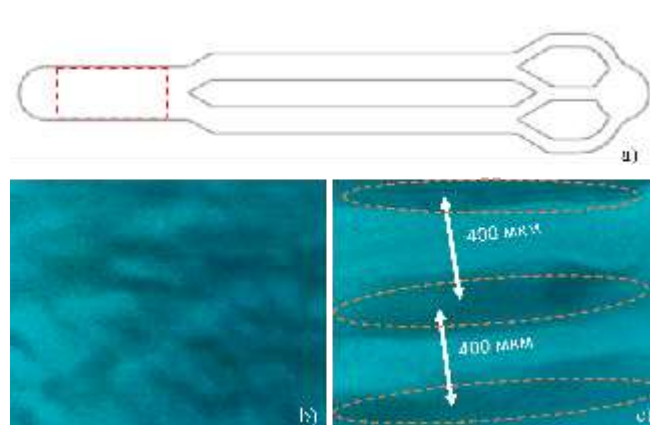


Рис. 5 Воздействие стоячей акустической волны на кровь: а) – исследуемая область канала; б) – область канала до включения поля; в) – область канала после включения

Результаты работы показывают, что акустофлюидные системы могут быть применены для решения задач клеточной инженерии, органов-на-чипе, лабораторий-на-чипе, инженерии тканей и других. Подтверждена эффективность применения управляемых акустических волн для разделения клеток и частиц в микрофлюидных каналах. Предложен и реализован метод выделения фракций клеток крови и модельных опухолевых клеток на основе двухстадийной схемы сепарации, сочетающей стоячие и бегущие акустические волны. Результаты работы будут использованы в дальнейшей разработке единого устройства для диагностики лимфомы.

Авторы благодарят Доцента кафедры микро- и наноэлектроники (МНЭ) СПбГЭТУ «ЛЭТИ», кандидата физико-математических наук Татьяну Михайловну Зимину за ценные советы.

Список литературы

1. Liu, Xianglian, et al. "Surface acoustic wave based microfluidic devices for biological applications." *Sensors & Diagnostics*, 2023, vol. 2, pp. 507–528. DOI: 10.1039/d2sd00203e.
2. Al-Faqheri W., Thio T.H.G., Qasaimeh M.A., Dietzel A., Madou M., Al-Halhouli A. Particle/cell separation on microfluidic platforms based on centrifugation effect: a review // *Microfluidics and Nanofluidics*, 2017. – Vol. 21. – Article 102. – DOI: 10.1007/s10404-017-1933-4.
3. Демина Е.А. Руководство по лечению лимфомы Ходжкина. 2-е изд., доп. – М.: Рекламное агентство «Ре Медиа», 2021. – 96 с.
4. Майорова М.В., Казакевич В.И., Волченко Н.Н., Степанов С.О. Современные подходы к диагностике лимфомы // *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена*. — 2016. — №5. — С. 61-65.
5. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. – 239 с.

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ЧИПА И МЕТОДА ЭКСПЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТИВОРАКОВОГО ПРЕПАРАТА БИКАЛУТАМИДА

Руч С.Д.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Разработана гибридная интегрированная микрофлюидная система для экспрессного количественного определения противоопухолевого препарата антиандрогенного действия бикалутамида. Актуальность работы связана с ростом заболеваемости раком и высокой токсичностью противоопухолевых препаратов, что требуют оперативного контроля их концентрации в крови для персонализации терапии. Поэтому целью работы стала разработка гибридного микрофлюидного чипа и метода экспресс-определения противоракового препарата бикалутамида в крови. Создана система, включающая модули пробоподготовки, микрофлюидного транспорта и флуоресцентного детектирования. Экспериментально обосновано применение ацетона как осадителя белков плазмы, что обеспечило одноэтапную пробоподготовку в чипе-смесителе с ламинарным потоком. Количественное определение бикалутамида проводится флуоресцентным методом при длине волны возбуждения 280 нм. Разработанная лаборатория-на-чипе позволяет сократить время анализа по сравнению с хроматографическими методами и перспективна для терапевтического лекарственного мониторинга.

Ключевые слова – гибридный микрофлюидный чип, модуль захвата клеток, модуль осаждения белков плазмы, детектирование доксорубицина, детектирование бикалутамида

Современная медицина, и в первую очередь онкология, остро нуждается в принципиально новых инструментах диагностики и мониторинга терапии. Традиционные аналитические методы, несмотря на высокую точность, отличаются длительностью (до нескольких часов на одну пробу), трудоёмкостью и требуют громоздкого лабораторного оборудования. В то же время интенсивная терапия онкологических заболеваний, сопряжённая с высокой токсичностью препаратов и риском полиорганной недостаточности, диктует необходимость экспресс-контроля концентрации лекарственных средств непосредственно у постели больного [1]. Ключом к решению этой проблемы выступает микросистемная техника – междисциплинарная область, интегрирующая достижения микроэлектроники, нанотехнологий и микрофлюидики. Результатом такой интеграции стала концепция «лаборатории-на-чипе» – миниатюрного аналитического устройства, объединяющего на одной платформе операции пробоподготовки, дозирования, смешивания, разделения и детектирования [2]. Переход от макроскопических приборов к микросистемам не просто уменьшает габариты: масштабирование до микронных размеров кардинально меняет физику процессов – доминирующую роль приобретают ламинарные течения, капиллярные силы и молекулярная диффузия. Это открывает возможности для прецизионного манипулирования сверхмалыми объёмами жидкостей и создания компактных, быстродействующих и высокочувствительных систем, не реализуемых в макромире.

Бикалутамид – нестероидный антиандрогенный препарат, широко применяемый в терапии рака предстательной железы. Спектральные свойства препарата были основополагающими для разработки системы детектирования. Спектр поглощения бикалутамида (рис. 1, левый) демонстрирует пик при ~270 нм. Его спектр флуоресценции (рис. 1, правый), измеренный при возбуждении 280 нм, показывает широкую полосу излучения в диапазоне 320-400 нм с максимумом при ~330-340 нм.

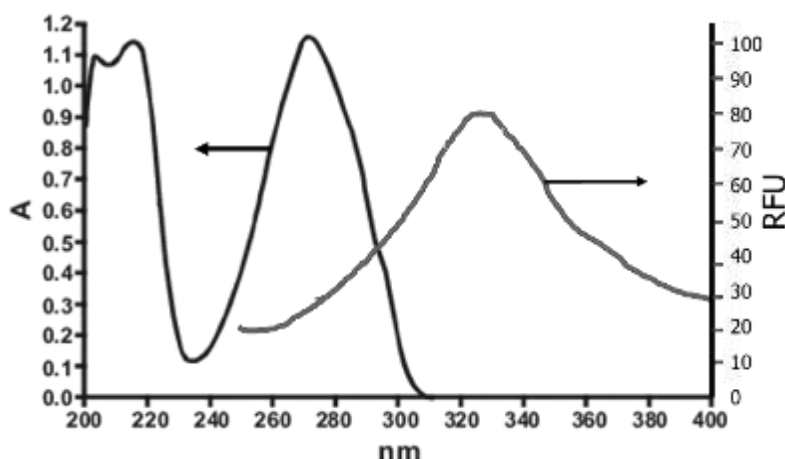


Рис. 1. Спектральные характеристики поглощения и флуоресценции бикалутамида.

Этот спектр флуоресценции перекрывается со спектрами белков сыворотки крови, что делает невозможным прямое детектирование в цельной плазме. Таким образом, разработка гибридной лаборатории-на-чипе, объединяющей в себе микрофлюидную пробоподготовку и оптическое детектирование на микросистемной платформе, является актуальной научно-технической задачей, лежащей на стыке нанотехнологий, микрофлюидики и биоэлектроники.

Общий вид устройство показан на рис. 2.

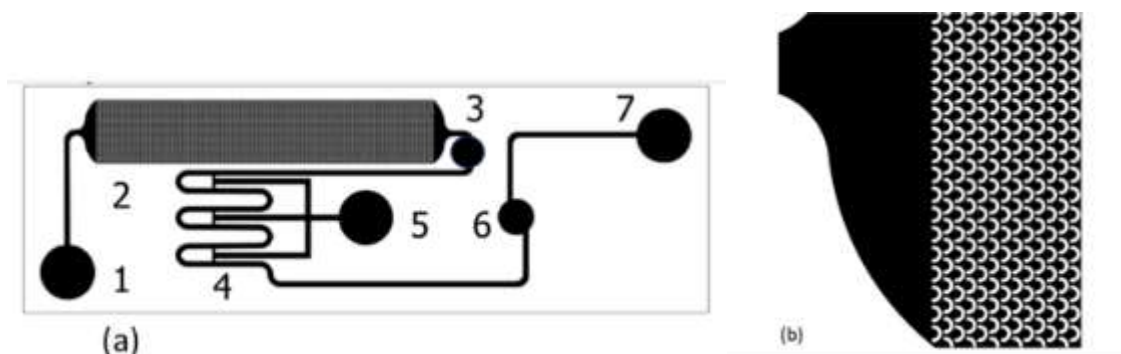


Рис. 2. Топология микрофлюидной системы для детектирования противоопухолевых препаратов в крови. (а) Общий вид; (б) фрагмент клеточного фильтра. 1 – вход, 2 – клеточный фильтр, 3 – оптическое окно для доксорубина, 4 – система смешивания для осаждения белков, 5 – вход для ацетона, 6 – оптическое окно для бикалутамида, 7 – выход.

На данном этапе рассматривается способ выделения препарата, находящегося в комплексе с белком и его детектирование. Белки плазмы крови (альбумин и глобулины) имеют собственный спектр флуоресценции с максимумом около 330-350 нм, практически совпадающий со спектром флуоресценции бикалутамида (~330-340 нм). Это делает невозможным прямое количественное определение препарата в плазме без предварительного удаления белковой матрицы. Кроме того, бикалутамид на 96–99 % связан с альбумином, что требует разрушения белкового комплекса для высвобождения аналита в свободную форму, доступную для детектирования. Для реализации данной задачи разработан специальный чип, который позволяет исследовать процесс осаждения белков плазмы крови, захват осадка – денатурированных белков и растворение целевого компонента – бикалутамида с возможностью его детектирования в области УФ излучения. Исследованы характеристики осаждения белков, на модели бычьего сывороточного

альбумина и выбран растворитель – ацетон при комнатной температуре и охлажденный (рисунок 3, а, b)

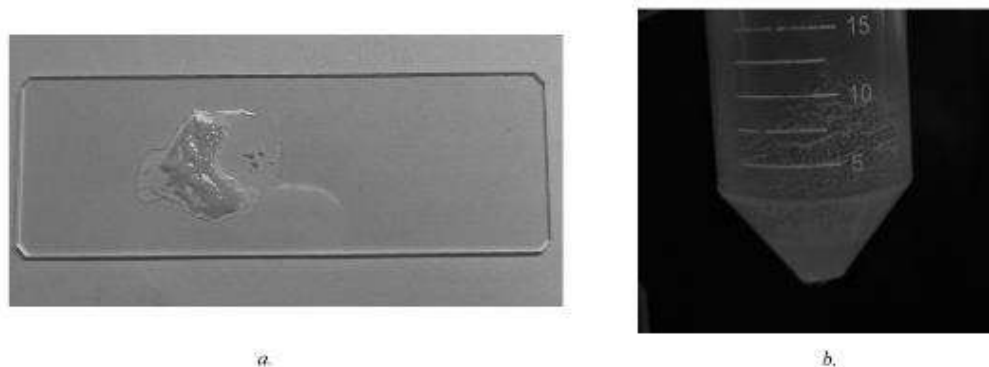


Рис 3. Осаждение белков с ацетоном комнатной температуры (а) с охлажденным ацетоном (b).

Для реализации метода разработан гибридный микрофлюидный чип, показанный на рисунке 4, объединяющий модули пробоподготовки и оптического детектирования на одной платформе. Чип содержит два входных порта (для плазмы крови и ацетона-осадителя), Т-образный микромиксер и смесительный канал типа «прямоугольная волна», в котором за счёт вторичных течений обеспечивается эффективная гомогенизация потоков [3]. Сформировавшаяся смесь поступает в камеру осаждения белков, после чего супернатант, содержащий бикалутамид, направляется в зону оптического детектирования. Детектирование осуществляется по собственной флуоресценции бикалутамида при длине волны возбуждения 280 нм через оптическое окно, интегрированное в чип.

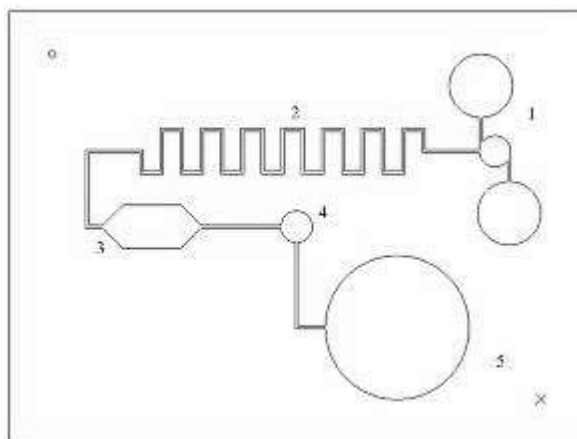


Рис 4. Топология чипа для смешивания плазмы крови с ацетоном и детектирования. 1 – вход и Т-образный миксер, 2 – канал с прямоугольной волной, 3 – камера осаждения белка, 4 – оптическое окно для бикалутамида, 5 – выход.

В работе проведено теоретическое обоснование и проектирование гибридной микрофлюидной системы для экспресс-определения бикалутамида в плазме крови. На основе анализа спектральных свойств бикалутамида и белков плазмы показана необходимость стадии депротеинизации перед флуоресцентным детектированием. В качестве осадителя обоснованно выбран ацетон, обеспечивающий максимальную степень осаждения белков при минимальных потерях целевого анализата.

Спроектирована топология микрофлюидного чипа, включающего Т-образный миксер с каналом типа «прямоугольная волна» и камеру осаждения. Совокупность полученных результатов закладывает теоретическую и конструкторскую базу для создания лаборатории-на-чипе, предназначенной для персонализированного мониторинга противоопухолевой терапии.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – Зиминой Т.М. – за постановку задачи, ценные обсуждения и всестороннюю поддержку на всех этапах выполнения работы.

Список литературы

1. Ruch S., Sudareva N., Brovkin E., Zimina T., Oparina O., Sitkov N. Hybrid Microfluidic System for Quantitative Detection of Doxorubicin and Bicalutamid in Oncotheranostics // *ElCon-EE: 2026 Conference of Young Researchers in Electrical Engineering, Automation and Control Systems*. – 2026. – P. 138–142. – DOI: 10.1109/ElCon-EE69794.2026.11452683.
2. Всемирная организация здравоохранения. Профили онкологических заболеваний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/teams/noncommunicable-diseases/surveillance/data/cancer-profiles> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Parallel channel [Электронный ресурс] // ScienceDirect. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/parallel-channel> (дата обращения: 23.04.2026).
4. Zhu Y., Fang Q. Analytical detection techniques for droplet microfluidics – A review // *Analytica Chimica Acta*. – 2013. – Vol. 787. – P. 24–35.
5. Gossett D. R. et al. Label-free cell separation and sorting in microfluidic systems // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. – 2010. – Vol. 397. – P. 3249–3267.
6. Greenbaum A. et al. Imaging without lenses: achievements and remaining challenges of wide-field on-chip microscopy // *Nature Methods*. – 2012. – Vol. 9. – No. 9. – P. 889–895.
7. Yang H., Gijb M. A. M. Micro-optics for microfluidic analytical applications // *Chemical Society Reviews*. – 2018. – Vol. 47. – No. 4. – P. 1391–1458.
8. Evstratov A. A. et al. Nanotechnologies in biology and medicine. Microfluidics. – 2015.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

САЙГУШЕВА А.В.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. В статье рассматриваются физические основы двухэнергетической рентгенографии и томографии, основанные на зависимости коэффициента ослабления рентгеновского излучения от энергии и свойств материала. Описаны основные механизмы взаимодействия излучения с веществом и принципы разделения материалов при использовании двух энергетических диапазонов. Особое внимание уделено разработке программного модуля, реализующего обработку двух наборов данных, полученных при различных энергиях. Представлены этапы обработки: совмещение данных, подготовка к реконструкции и визуализация с использованием псевдоцветового кодирования материалов. Разработанное программное обеспечение может применяться в системах неразрушающего контроля и томографических комплексах..

Ключевые слова: двухэнергетическая томография, рентгенография, неразрушающий контроль, обработка изображений, разделение материалов.

Введение

Методы неразрушающего контроля широко применяются для анализа внутренней структуры объектов без нарушения их целостности. Одним из наиболее

распространённых методов является рентгенографический контроль, основанный на регистрации ослабления ионизирующего излучения при прохождении через объект.

Однако традиционные методы рентгенографии и томографии имеют ограниченную информативность при исследовании объектов, состоящих из материалов с близкими физическими характеристиками. В таких случаях затруднено различение отдельных компонентов, так как измеряется интегральный коэффициент ослабления.

Для решения данной задачи применяется двухэнергетическая томография, позволяющая учитывать зависимость ослабления излучения от энергии и тем самым получать дополнительную информацию о составе объекта.

Физические основы двухэнергетической томографии

При прохождении рентгеновского излучения через вещество его интенсивность уменьшается в соответствии с экспоненциальным законом ослабления:

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$

где I_0 — начальная интенсивность, I — интенсивность после прохождения через объект, μ — коэффициент ослабления, d — толщина материала.

Коэффициент ослабления зависит от энергии излучения и свойств материала, таких как атомный номер и плотность. Основной вклад в ослабление вносят три процесса: фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электрон-позитронных пар.

В двухэнергетических методах измерения проводятся при двух различных энергиях — условно «низкой» и «высокой». Это позволяет получить два набора данных для каждой точки объекта. В результате можно составить систему уравнений, связывающую измеренные значения с параметрами материалов.

Коэффициент ослабления представляется в виде линейной комбинации базисных функций:

$$\mu(E) = a_1 f_1(E) + a_2 f_2(E)$$

где a_1, a_2 — коэффициенты, характеризующие вклад различных материалов или механизмов взаимодействия.

Решение соответствующей системы уравнений позволяет определить параметры, связанные с составом объекта, например эффективный атомный номер или плотность.

Двухэнергетический подход позволяет значительно повысить информативность рентгеновских методов и обеспечивает возможность разделения материалов с близкими характеристиками.

Разработка программного модуля

Разработка программного модуля направлена на реализацию обработки данных, полученных при двух различных энергиях, и их подготовку для дальнейшего анализа и визуализации.

Программный модуль реализован с использованием языка программирования C++ и фреймворка Qt, что обеспечивает высокую производительность и удобство разработки пользовательского интерфейса.

Общая схема работы:

Работа программного модуля включает несколько основных этапов:

1. Загрузка и обработка исходных данных

На вход подаются два набора изображений, полученных при различных энергетических режимах. Эти данные могут быть получены с использованием различных методов двухэнергетической съёмки.

2. Совмещение данных

Поскольку изображения могут иметь геометрические различия, выполняется их приведение к единой системе координат. Это необходимо для корректного сопоставления соответствующих пикселей.

3. Подготовка к реконструкции

После совмещения данные нормализуются и преобразуются. На данном этапе может выполняться логарифмическое преобразование интенсивностей, обеспечивающее переход от экспоненциальной зависимости к линейной форме.

4. Реконструкция

Полученные данные передаются во внешнее программное обеспечение для выполнения томографической реконструкции. Данный этап в рамках рассматриваемого модуля не реализуется.

5. Обработка и визуализация результатов

После реконструкции выполняется анализ и визуализация данных. Для отображения структуры объекта используется цветовое кодирование, позволяющее различать материалы по их характеристикам.

Алгоритмы обработки:

Обработка данных включает следующие ключевые этапы:

- предобработка (фильтрация шумов, коррекция неравномерностей);
- геометрическое совмещение изображений;
- логарифмическое преобразование интенсивностей;
- подготовка данных для разложения;
- визуализация результатов.

Особое внимание уделяется точности совмещения и корректности предварительной обработки, так как ошибки на этих этапах приводят к существенным искажениям при дальнейшем анализе.

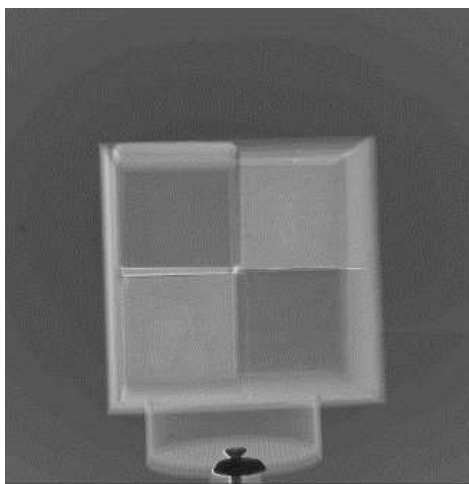


Рис.1. Интерфейс разработанного программного модуля для наложения снимков

Визуализация материалов

Результаты обработки представляются в виде псевдоцветных изображений, где каждому диапазону значений соответствует определённый цвет. Это позволяет:

- выделять различные материалы;
- повышать контраст между областями;
- упрощать интерпретацию результатов.

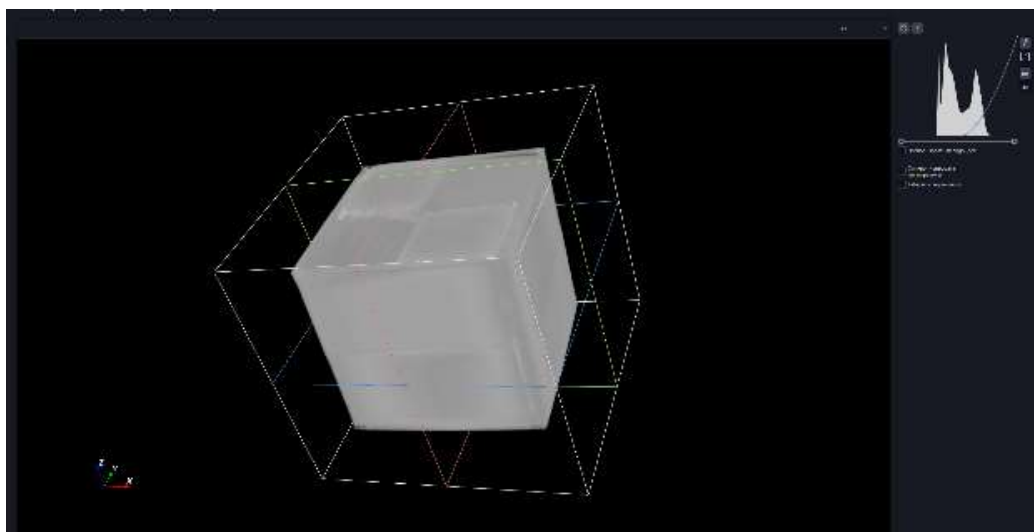


Рис.2. Визуализация результатов анализа материала

Заключение

Двухэнергетическая томография является эффективным методом повышения информативности рентгенографического контроля за счёт использования зависимости коэффициента ослабления от энергии излучения.

Разработанный программный модуль обеспечивает обработку двух наборов данных, их совмещение, подготовку к реконструкции и визуализацию результатов. Реализованный подход позволяет упростить использование двухэнергетических методов и повысить качество анализа структуры объектов.

Благодаря использованию C++ и Qt программный модуль обладает гибкостью и может быть интегрирован в различные системы неразрушающего контроля и томографические комплексы.

Список литературы

1. Fornaro J., Leschka S., Hibbeln D. Dual- and multi-energy CT: approach to functional imaging. Insights into Imaging, 2011.
2. McCollough C., Leng S., Yu L., Fletcher J. Dual- and Multi-Energy Computed Tomography: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications. Radiology, 2015.
3. Goo H.W. Dual-Energy CT: New Horizon in Medical Imaging. Korean Journal of Radiology, 2017.
4. Borges A.P., Antunes C., Curvo-Semedo L. Pros and Cons of Dual-Energy CT Systems. Tomography, 2023..
5. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography. Physics in Medicine and Biology, 1976.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИЛООБРАЗНОГО МИКРОФЛЮИДНОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕШИВАНИЯ СУСПЕНЗИИ МИКРООРГАНИЗМОВ И РАСТВОРОВ АНТИБИОТИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ

СИБГАТОВ Р. Р.¹, КОМАРОВ А.А.¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)»

Аннотация. В данной работе представлены результаты проектирования микрофлюидного смесителя для применения в системе анализа антибиотикорезистентности микроорганизмов. Выбор топологии проводится при помощи симуляции методом конечных элементов для следующих структур: Y-канал, зигзагообразный канал с добавлением поперечных и пилообразный канал. Далее приводятся результаты испытаний лабораторного макета пилообразного канала.

Ключевые слова: Микрофлюидика, микрофлюидные смесители, пассивные смесители, антибиотикорезистентность

Проблема антибиотикорезистентности микроорганизмов является одной из наиболее серьезных для человечества по версии ВОЗ. Это также доказывается тем, что по прогнозам к 2050 году, смертность в результате антибиотикорезистентности может составлять до 10 млн человек в год [1]. В нашей научной группе разрабатывается система анализа чувствительности микроорганизмов к антибиотикам, в которой используется лаборатория-на-чипе, осуществляющая подготовку проб и содержащая в микрорезервуарах исследуемые суспензии для проведения анализа. Для реализации в лаборатории-на-чипе смешивания антибиотика с суспензией микроорганизмов рассматриваются пассивные микрофлюидные миксеры, поскольку данный тип миксеров не требует дополнительных источников питания и является наиболее технологичным.

Следует отметить, что в микрофлюидных системах числа Рейнольдса настолько малы, что импульса жидкости недостаточно для формирования ламинарных вихрей. Поэтому, существует широкий ряд подходов по увеличению качества смешивания для пассивных миксеров. Из них выбраны подходы, с использованием 2D-структур, которые включают использование зигзагообразных каналов и добавление поперечных каналов [2]. Для них проведены симуляции методом конечных элементов (МКЭ) и проведены испытания на тестовых образцах. Для оценки эффективности структур использовалась метрика – абсолютная эффективность смешивания (AMI), вычисляемая по формуле [3]:

$$AMI = \frac{\sigma}{\langle c \rangle} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - \langle c \rangle)^2}}{\langle c \rangle},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение концентрации (СКО), c_i – концентрация вещества в i -й точке, $\langle c \rangle$ – средняя концентрация поперечном сечении, N – количество точек в поперечном сечении.

Для данной метрики случай гомогенной системы (максимального смешения) соответствует $AMI = 0$, когда $\sigma = 0$.

Подбор топологии при симуляции проводился с применением подходов создания зигзагообразных и поперечных каналов. Сравнение проводилось по отношению к классической топологии Y-канала.

Симуляция методом МКЭ проводилась для канала с шириной и высотой 1 мм и коэффициентом диффузии равным $1 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и начальной концентрацией модельного вещества равным 35 мкМ. Данные параметры повторяются также для последующих симуляций. Топология рассматриваемого Y-канала и распределение концентрации вещества представлены на Рис. 1, А: График распределения концентрации по поперечному сечению канала в конце смесителя представлен на Рис 1, Б. По итогам симуляции AMI составил $1,8 \times 10^{-1}$.

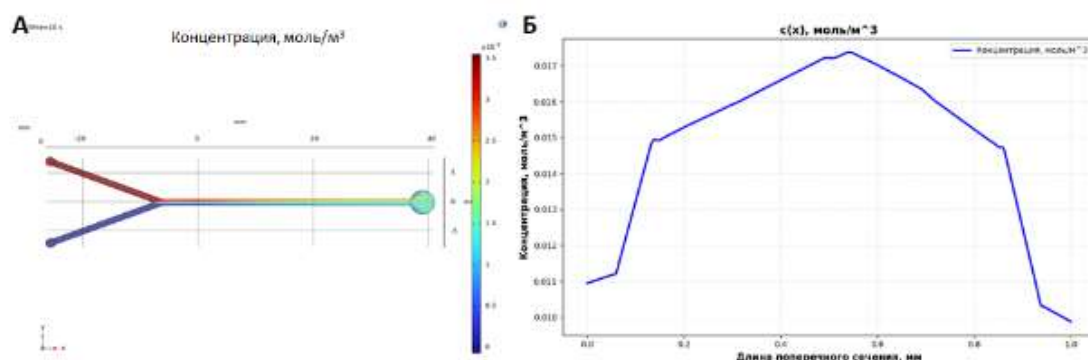


Рис. 1. Результаты симуляции для Y-канала. А – топология и распределение концентрации по структуре. Б – График распределения концентрации в поперечном сечении в конце смесителя.

Далее симуляция проводилась для топологии зигзагообразного канала с добавлением поперечных каналов. Данная топология с применением поперечных каналов с распределением концентрации вещества в структуре представлена на Рис. 2, А. График распределения концентрации по поперечному сечению канала представлен на Рис. 2, Б. По итогам симуляции AMI составил $2,5 \times 10^{-2}$.

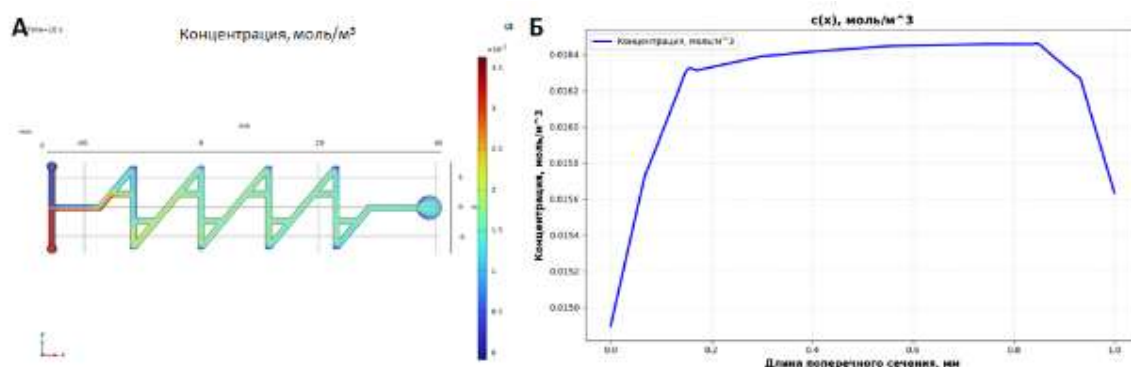


Рис. 2. Результаты симуляции для зигзагообразного смесителя с добавлением поперечных каналов. А – топология и распределение концентрации по структуре. Б – График распределения концентрации в поперечном сечении в конце смесителя

На следующей топологии, внутрь зигзагообразного канала были добавлены препятствия в виде шипов, из-за чего ей было дано название пилообразной. Топология и распределение концентрации, полученное в результате симуляции МКЭ, представлено на Рис. 3, А. График распределения концентрации по поперечному сечению канала в конце смесителя представлен на Рис. 3, Б. По итогам симуляции AMI составил $1,4 \times 10^{-3}$.

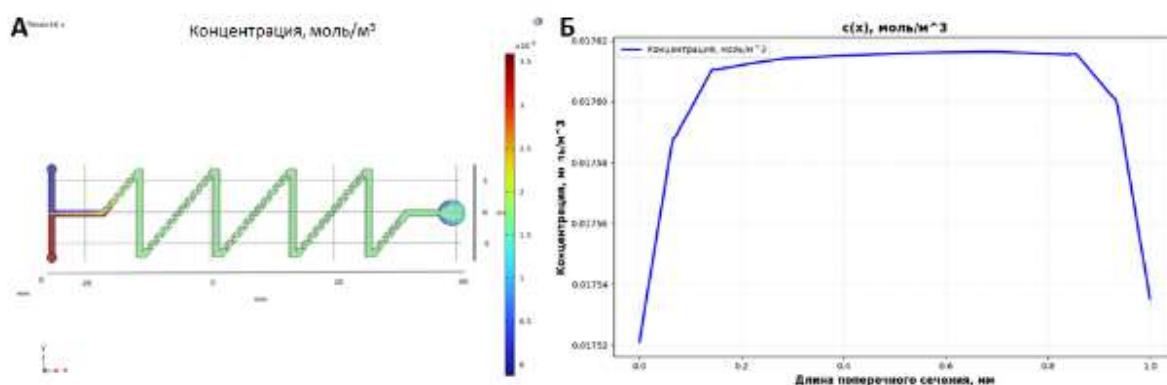


Рис. 3. Результаты симуляции для пилообразного канала. А – топология и распределение концентрации по структуре. Б – График распределения концентрации в поперечном сечении в конце смесителя

Результаты вычислений по всем трем топологиям представлены в Таблице 1. По данным, полученным в ходе симуляции, наименьшему значению АМІ соответствует пилообразный миксер, а, следовательно, и наибольшей эффективности смешивания.

Таблица 1

Сравнение смесителей

Наименование топологии	$\langle c \rangle$, моль $\times$ м ⁻³	σ , моль $\times$ м ⁻³	АМІ
У-канал	$1,4 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-1}$
Зигзагообразный канал с добавлением поперечных	$1,6 \times 10^{-2}$	4×10^{-4}	$2,5 \times 10^{-2}$
Пилообразный канал	$1,8 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-3}$

Для того, чтобы подтвердить эффективность пилообразного смесителя, были проведены испытания на лабораторном макете. Чип для проведения экспериментов изготавливался из листов ПММА толщиной 1 мм. Каналы внутри них формировались при помощи лазерной резки на ЧПУ-станке и соединение слоев производилось методом горячего тиснения. Изготовленный лабораторный макет представлен на Рис. 4.



Рис. 4. Изготовленный лабораторный макет

Тестирование изготовленного лабораторного макета представлено на Рис. 5, А. В нём для наглядности полученного результата смешивались вода и краситель метиленовый красный. Полученный профиль распределения красителя после 10 секунд приведен на Рис. 5, Б.

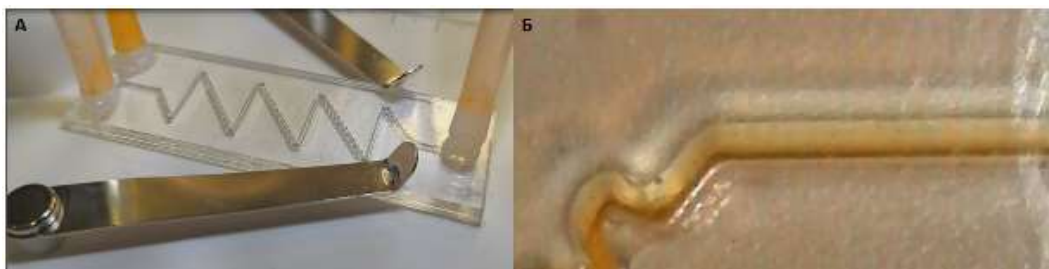


Рис. 5. Тестирование смесителя. А – Тестирование макета. Б – профиль распределения метиленового красного

Таким образом, в данной работе проведено сравнение эффективности ряда пассивных смесителей с двухмерной структурой. В ходе вычислений и испытаний выявлено, что наибольшей эффективностью смешивания из рассматриваемых топологий обладает пилообразный канал. Абсолютный индекс смешивания для него составил примерно $1,4 \times 10^{-3}$, поэтому данная топология предлагается к интеграции в лабораторию-на-чипе, разрабатываемую в нашей научной группе, для смешивания бактериальных суспензий с антибиотиками.

Авторы данной работы приносят искренние благодарности научному руководителю к.ф.-м.н., доценту кафедры МНЭ Зиминой Татьяне Михайловне.

Список литературы

1. Church N. A., McKillip J. L. Antibiotic resistance crisis: challenges and imperatives //Biologia. – 2021. – V. 76. – №. 5. – P. 1535-1550.
2. Lee C. Y., Chang C. L., Wang Y. N., Fu L. M. Microfluidic mixing: a review //International journal of molecular sciences. – 2011. – V. 12. – №. 5. – P. 3263-3287.
3. Hashmi A., Xu J. On the quantification of mixing in microfluidics //Journal of laboratory automation. – 2014. – V. 19. – №. 5. – P. 488-491.

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ КОНТРОЛЯ РОСТА КРИСТАЛЛОВ

СЛАУТИНА О.А., ВОЛЯНИЮК А.Ю., АНУФРИЕВ И.Е.

Университет ИТМО, научно-образовательный центр инфохимии

Аннотация. В исследовании была проведена адаптация микрофлюидного подхода для проведения спонтанной кристаллизации супрамолекулярных структур на основе азотсодержащих гетероциклов в условиях микрофлюидного капельного синтеза. Синтез был выполнен в микрофлюидном устройстве с топологией, разработанной под заданную кристаллизацию. Сравнение результатов синтеза в макро-объёме и в микрофлюидной установке проводилось с помощью метода оптической микроскопии. В исследовании проведено сравнение возможных подходов к управлению процессом кристаллизации супрамолекулярных структур, выявлены преимущества акустофлюидного контроля.

Ключевые слова: микрофлюидика, капельная кристаллизация, супрамолекулярные структуры

В настоящее время широкое развитие приобретает направление получения материалов на основе самопроизвольной супрамолекулярной сборки для нужд материаловедения [1]. Супрамолекулярные структуры образуются за счет нековалентных взаимодействий, таких как водородные, π - π , ионные, ван-дер-ваальсовы связи и гидрофобные взаимодействия. Одним из примеров супрамолекулярных структур на основе азотсодержащих гетероциклов является барбитурат меламина [2].

Несмотря на ярко выраженные функциональные свойства барбитурата меламина зависимость этих свойств от морфологии кристаллов достаточно значительна, что обуславливает основную проблему контроля кристаллизации данной супрамолекулярной структуры, связанную с хаотичностью роста и высокой дисперсией размеров и форм кристаллов. Для того, чтобы с большей точностью контролировать рост кристаллов может быть использован метод капельного синтеза, реализуемый в микрофлюидных системах.

Метод капельного синтеза - метод получения вещества с помощью изолированных капель жидкости в качестве реакционных камер. В микрофлюидных системах в каналы заданного размера с определённой скоростью поступают реагенты (как водные, так и органические), параллельно с ними под углом также поступает фаза-носитель с большей плотностью, которая препятствует движению непрерывного потока реагентов, что приводит к образованию отдельных капель реакционной смеси. Отдельная капля системы выступает в роли реактора идеального смешения [3].

Микрофлюидная система представляет собой чип, подложку с микроканалами, изготовленную из прозрачного материала, например полидиметилсилоксана (ПДМС), поликарбоната (ПК), полиметилметакрилата (ПММА). В зависимости от задачи система включает микрофлюидный чип определенной топологии и внешние устройства микрофлюидной установки: насос, системы управления и программное обеспечение, сенсорные устройства и датчики [4-5].

Для уменьшения вариативности морфологии кристаллов, реализации более тонкого контроля роста и манипуляции микрообъектами в каналах возможно дополнительное использование акустических волн. Акустофлюидика, один из разделов микрофлюидики, представляющий собой направление, связанное с транспортировкой и управлением жидкостями и взвешенными твердыми частицами с помощью акустических волн. Под действием акустического поля возникают силы, действующие на частицы, что позволяет управлять их движением и распределением в пространстве [6].

Для генерации акустических волн в микрофлюидных системах используются конструкции, способные генерировать поверхностные акустические волны (SAW). В результате пьезоэлектрического эффекта в подложке возникают волны, распространяющиеся вдоль её поверхности. При взаимодействии с жидкостью эти волны создают силы и потоки, воздействующие на частицы, они позволяют реализовывать различные эффекты, включая перенос частиц, струеобразование, образование капель и перемешивание в закрытых каналах [7-8].

В ходе работы были проведены сравнения форм кристаллов, образованных в условиях микрофлюидного капельного синтеза и в макрообъёме. В качестве реагентов для синтеза использовались барбитуровая кислота и меламин, при непосредственном смешении которых формируются супрамолекулярные кристаллические агрегаты. Полученные кристаллы барбитурата меламина могут иметь как поли-, так и монокристаллическую структуру, это наглядно видно в случае синтеза в макрообъёме.



Рис. 1. Кристаллы барбитурата меламина, полученные путем синтеза в макрообъёме

Исследование форм кристаллов методом оптической микроскопии выявило, что монокристаллические формы выглядят как вытянутые шестиугольники, поликристаллические формы могут быть различных видов, включая сращенные кристаллы и кристаллические агрегаты с ярко выраженным двойникованием от центра роста. В эксперименте использовались растворы барбитуровой кислоты и меламина с концентрацией 10 ммоль; аликвоты смешивались в соотношении 1:1. При изучении полученных кристаллов было выявлено количественное преобладание поликристаллической формы.

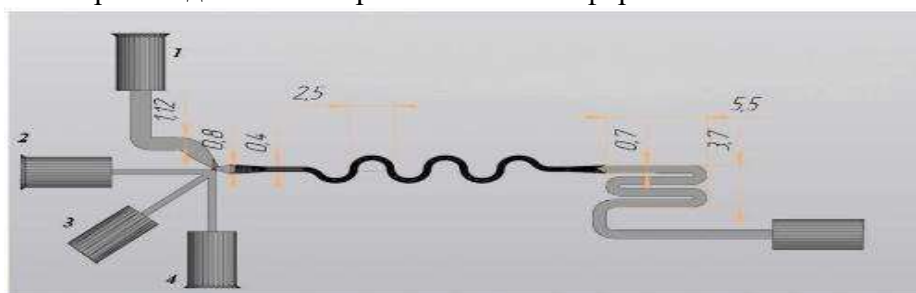


Рис. 2. Схема микрофлюидного чипа

Далее был проведён синтез в условиях микрофлюидного капельного синтеза. Был спроектирован чип для ввода 3 реагентов и фаза-носителя, схема которого приведена выше. В первый канал в качестве фаза-носителя направляется вазелиновое масло, во второй канал – барбитуровая кислота, в третий – соляная кислота, а в четвертый – меламина. Соляная кислота в данном эксперименте используется для промывания чипа и удаления кристаллов со стенки каналов в зоне смешения водных растворов реагентов. Оптимальные скорости подачи реагентов были определены в ходе эксперимента. Для подачи вазелинового масла 0,8 мкл/с, для барбитуровой кислоты 0,1 мкл/с, для меламина 0,1 мкл/с.

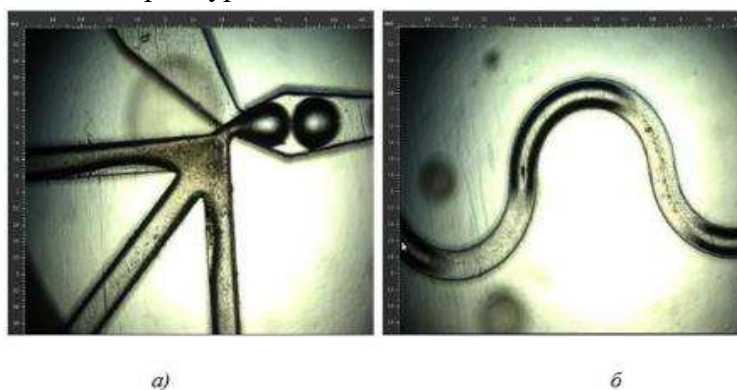


Рис. 3. Перемещение капель в чипе. а - зона генерации капель, б – зона меандра

Как видно на снимках, основная доля кристаллов барбитурата меламина обладает малой дисперсией по размерам; наблюдается редкое формирование поликристаллов с ярко выраженной анизотропией (поляризационный режим оптической микроскопии) с увеличенными размерами относительно общей выборки.



Рис. 4. Кристаллы барбитурата меламина в условиях микрофлюидного капельного синтеза, в режиме поляризационной съёмки

Для дальнейшего управления морфологией и размером кристаллов планируется дополнить схему блоком акустофлюидики, включающим кремниевый пьезоэлемент, размещенный по бокам от области канала после основного меандра, где капилляр расширяется, но также имеет изогнутую форму.

Список литературы

1. Xiumei Li, Wanjia Xu, Yue Xin, Jiawei Yuan, Yuancheng Ji, Shengnan Chu, Junqiu Liu and Quan Luo. Supramolecular Polymer Nanocomposites for Biomedical Applications // *Polymers* 2021, 13(4), 513; DOI: 10.3390/polym13040513
2. Vladimir V. Shilovskikh, Alexandra A. Timralieva, Pavel V. Nesterov, Dr. Alexander S. Novikov, Dr. Petr A. Sitnikov, Prof. Elizaveta A. Konstantinova, Prof. Alexander I. Kokorin, Prof. Ekaterina V. Skorb. Melamine–Barbiturate Supramolecular Assembly as a pH-Dependent Organic Radical Trap Material // *Chem. Eur. J.* 2020, 26, 16603 – 16610 DOI: 10.1002/chem.202002947
3. Zhao-Miao LIU, Yang YANG, Yu DU, Yan PANG. Advances in Droplet-Based Microfluidic Technology and Its Applications // Volume 45, Issue 2, February 2017 DOI: 10.1016/S1872-2040(17)60994-0
4. Ping Cui, Sicen Wang. Application of microfluidic chip technology in pharmaceutical analysis: A review // Volume 9, Issue 4, August 2019 DOI: 10.1016/j.jpha.2018.12.001
5. Adelina-Gabriela Niculescu, Cristina Chircov, Alexandra Cătălina Bîrcă and Alexandru Mihai Grumezescu. Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review // *Int. J. Mol. Sci.* 2021, 22(4), 2011; DOI: 10.3390/ijms22042011
6. Peng Li and Tony Jun Huang. Applications of Acoustofluidics in Bioanalytical Chemistry // *Anal. Chem.* 2019, 91, 757–767 DOI: 10.1021/acs.analchem.8b03786
7. Toktam Godary,† Brandi Binkley,† Zhengru Liu, Olanrewaju Awoyemi, Amanda Overby, Herbi Yuliantoro, Bethany J. Fike, Sydney Anderson, and Peng Li. Acoustofluidics: Technology Advances and Applications from 2022 to 2024 // *Anal. Chem.* 2025, 97, 6847–6870 DOI: 10.1021/acs.analchem.4c06803
8. William Connacher, Naiqing Zhang, An Huang, Jiyang Mei, Shuai Zhang, Tilvawala Gopesh and James Friend. Micro/nano acoustofluidics: materials, phenomena, design, devices, and applications // Received 30th January 2018, Accepted 8th June 2018 DOI: 10.1039/c8lc00112j

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО МИКРОРЕАКТОРА НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ТЕРАНОСТИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

СМИРНОВ Е.А.^{1,2}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследова-тельский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Аннотация. В работе рассматривается подход к созданию химически стойкого микрореактора для задач жидкофазного синтеза наноразмерных объектов, включая магнитные наночастицы и пептидные последовательности. Конструкция изделия реализована методом 3D-печати из фото-полимерной смолы с последующей пассивацией внутренней поверхности фторопластовым лаком. Включение в конструкцию пористого фильтра Шотта и дифференцированных каналов для подачи реагентов и отвода жидкости под вакуумом позволяет адаптировать устройство для работы в со-ставе автоматизированного синтезатора. Проведена оценка химической стойкости конструкцион-ных материалов в агрессивных средах, а работоспособность реактора подтверждена успешным синтезом модельного дипептида аланина на автоматизированной модульной платформе.

Ключевые слова: микрореактор, 3D-печать, фотополимерная смола, химическая стойкость, синтез нано-частиц, синтез пептидов, лаборатория-на-чипе, персонализированная медицина.

Развитие аппаратной базы для химического синтеза в области нанотехнологий и персонализированной медицины сталкивается с необходимостью поиска компромисса между химической инертностью конструкционных материалов и технологичностью их обработки [1]. Традиционно используемые стеклянные микрофлюидные системы и реакторные блоки, несмотря на высокую устойчивость к агрессивным средам, характеризуются значительной трудоемкостью формовки внутренних полостей сложной геометрии и низкой воспроизводимостью при ручном изготовлении. Фотополимерные смолы, отверждаемые по технологии 3D-печати, представляют собой жизнеспособную альтернативу стеклу с точки зрения формообразования, однако их применение сдерживается ограниченной химической стойкостью [2]. В отличие от микрофлюидных чипов, где важна оптическая прозрачность и морфология поверхности канала для детектирования сигнала, в реакторах для синтеза магнитных или золотых наночастиц, а также в твердофазном пептидном синтезе, на первый план выходят барьерные свойства материала по отношению к агрессивным компонентам реакционной среды. Настоящая работа предлагает инженерную реализацию химически стойкого микрореактора, предназначенного для интеграции в платформу автоматизированного синтеза наноразмерных тераностических агентов.

Разрабатываемый микрореактор позиционируется как сменный картридж для установки BioFab (БиоФаб, Россия), проектируемой как модульная система твердофазного синтеза (Рис. 1 в). Конструкция реакторного блока позволяет проводить широкий спектр операций жидкофазного синтеза в агрессивных средах, что напрямую обусловило выбор аддитивных технологий в качестве метода изготовления корпуса. Процесс печати реализован на платформе Saturn 4 Ultra (Elegoo, Китай) методом послойного отверждения фотополимерной смолы. Технологический цикл включал погружение рабочей платформы

в ванну с жидкой смолой на глубину одного слоя, составляющую 10 мкм, с последующим избирательным экспонированием участков, соответствующих текущему сечению модели.

Под действием УФ-излучения инициировалась локальная полимеризация, после чего платформа поднималась, отделяя затвердевший слой от дна ванны, и цикл повторялся для следующего сечения. Достижимое разрешение печати на уровне 10–20 мкм позволяет воспроизводить элементы конструкции реактора с точностью, достаточной для формирования горловины подачи реагентов, дренажных каналов и посадочного места под фильтрующий элемент (Рис. 1 а, б). После завершения печати изделие прошло постобработку, включающую промывку в этиловом спирте для удаления остатков незаполимеризовавшейся смолы и финишное УФ-отверждение, повысившее механическую прочность корпуса.

Основной проблемой, требующей решения, является подверженность деградации в агрессивных средах: кислоты и органические растворители, - неизбежно используемые в процессе синтеза [3]. Для устранения ограничения применен метод пассивации внутренних стенок реактора химически стойким фторопластовым лаком, формирующим барьерный слой с высокой инертностью к используемым реагентам. Конструктивно реактор представляет собой камеру объемом несколько миллилитров с горловиной для ввода компонентов синтеза в верхней части и интегрированным дренажным узлом в основании. Удержание твердой фазы обеспечивается впаянным в основание стеклянным фильтром Шотта заданной пористости. Схема предусматривает два независимых канала в нижней части устройства: канал для отвода жидкой фазы под действием вакуума и отдельный канал для подачи или стравливания газа. Подобное разделение потоков позволяет избежать образования застойных зон и нежелательного перемешивания при резком сбросе вакуума, что позволяет работать с малыми объемами наноматериалов, склонных к агрегации.



Рис. 1. Микрореактор на основе аддитивных технологий; а, б – базовая и доработанная версии микрореак-торов; в – микрореактор в системе модульного автоматизированного синтезатора BioFab

Для обоснования выбора конструкционных материалов и защитного покрытия была проведена серия экспериментов по определению химической стойкости в средах, типичных для твердофазного пептидного синтеза и синтеза наночастиц. Образцы исходного фотополимера и образцы с нанесенным фторопластовым покрытием

одновременно помещались в емкости с агрессивными средами: дихлорметан, 0,1н раствор гидроксида натрия, концентрированная трифторуксусная и соляная кислоты. В ходе наблюдений зафиксировано, что при экспозиции в дихлорметане, незащищенный фотополимер подвергался набуханию спустя 15 минут и размягчению спустя 140 минут, тогда как лакированная поверхность сохраняла исходную структуру. Аналогичные результаты получены при выдерживании в растворе 0,1н NaOH, на поверхности незащищенного фотополимера появлялись видимые изменения, через 15 минут покрытие начинало заметно мутнеть, а спустя 140 минут структура заметно деформировалась. В среде концентрированной трифторуксусной и соляной кислот исходный фотополимер демонстрировал слабое набухание, в то время как образец с фторопластовым покрытием, аналогично эталонному фторопласту, сохранял исходную структуру без видимых изменений. Полученные данные (Таблица 1) свидетельствуют о том, что нанесение фторопластового покрытия компенсирует уязвимость фотополимерной подложки к щелочным, кислотным и органическим средам, доводя химическую стойкость реактора до уровня, сопоставимого с чистым фторопластом или стеклом. Дополнительно проведенная проверка адгезии покрытия в условиях циклического перепада давлений при вакуумном дренаже не выявила признаков отслоения или образования микропор. Оценка проводилась гравиметрическим методом и визуальным контролем набухания поверхности. В качестве референсных значений использованы показатели для чистого фторопласта.

Таблица 1

Сравнительная оценка химической стойкости материалов

Материал / Среда	Фотополимер (исходный)	Фотополимер + Фторопластовый лак	Фторопласт (эталон)
Дихлорметан (ДХМ)	Сильное набухание, размягчение	Без изменений	Без изменений
0,1н NaOH	Набухание, помутнение поверхности	Без изменений	Без изменений
Конц. CF ₃ COOH	Слабое набухание	Без изменений	Без изменений
Конц. HCl	Слабое набухание	Без изменений	Без изменений

Практическая верификация работоспособности разработанного микрореактора осуществлялась в составе автоматизированного модульного синтезатора BioFab в режиме выполнения полного цикла твердофазного пептидного синтеза. В качестве модельного соединения был выбран тестовый пептид, синтезируемый по стандартным протоколам. Контроль корректности протекания химических превращений на каждом этапе проводился с применением качественных реакций. При индикации с использованием оранжево-желтого красителя, после стадии деблокирования аминокислоты, интенсивность окраса визуально возрастала. Тестирование на присутствие свободных аминогрупп выполнялось в водном растворе нингидрина с концентрацией 0,2%: после нейтрализации среды и непродолжительного нагрева фиксировалось характерное синее окрашивание, подтверждающее успешное протекание реакции деблокирования (Рис. 2 б). По завершении процесса отщепления синтезированной пептидной последовательности от полимерного носителя и полного удаления растворителя на поверхности наблюдалось образование белого кристаллического налета, типичного для пептидных соединений (Рис. 2 в). Гомогенность полученного продукта оценивалась методом тонкослойной

хроматографии: наличие красно-фиолетовых пятен, расположенных на одном уровне для различных проб, указывало на однородность раствора и присутствие в нем целевого пептида (Рис. 2 г). Итоговое подтверждение успешности синтеза и высокой эффективности процесса получено методом масс-спектрометрии, зарегистрировавшей пик, соответствующий молекулярному иону синтезированного пептида (Рис. 2 а). На протяжении всего цикла синтеза микрореактор обеспечивал надежное удержание полимерной смолы на фильтре Шотта, герметичность соединений при вакуумном дренаже и отсутствие протечек, что в совокупности с данными масс-спектрометрии свидетельствует о химической инертности внутреннего объема и корректности выбранных конструкционных решений.

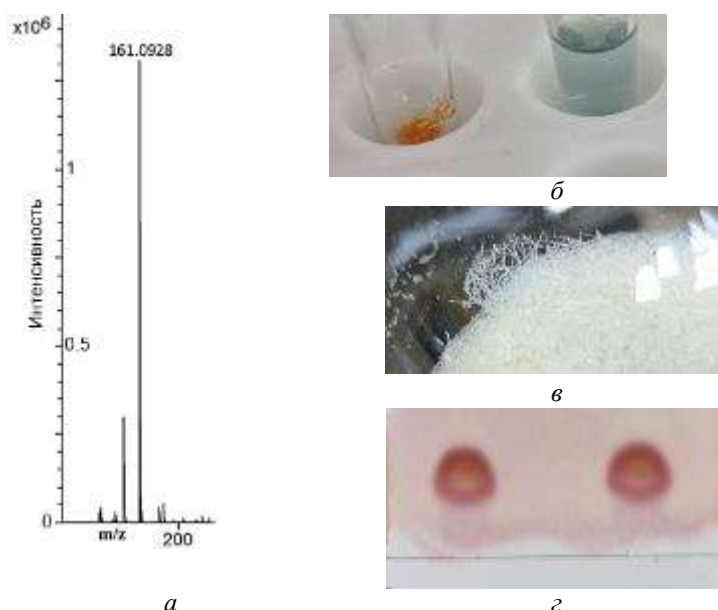


Рис. 2. Результаты апробации химического микрореактора; а – масс-спектр синтезированного дипептида аланина; б – результат качественных реакций; в – кристаллическая структура чистого пептида; г – результат тонкослойной хроматографии

Таким образом, представленная разработка демонстрирует переход от плоских микрофлюидных структур к объемным химически стойким микрореакторам с функцией полуавтоматического отделения жидкой фазы. Предложенный метод комбинирования 3D-печати фотополимерами с нанесением фторопластовых барьерных покрытий позволяет тиражировать реакторы сложной геометрии без привлечения дорогостоящего стеклодувного оборудования, а успешный синтез тестового пептида подтверждает практическую применимость подхода для задач твердофазного синтеза, что открывает возможность масштабирования синтеза наноразмерных терапевтических агентов для задач персонализированной медицины. Дальнейшая работа направлена на адаптацию геометрии реакционной камеры под синтез магнитных наночастиц методом соосаждения и оптимизацию режимов вакуумного дренажа для различных классов растворителей.

Работа выполнена при поддержке ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России в рамках государственного задания

«Разработка метода адресной доставки на основе наноконъюгатов кардио-таргетных пептидов» (рег. №: 1240216000631).

Список литературы

1. Monbaliu J. C. M., Legros J. Will the next generation of chemical plants be in miniaturized flow reactors? //Lab

on a Chip. – 2023. – Т. 23. – №. 5. – С. 1349-1357.

2. Смирнов, Е. А. Исследование применимости новых материалов для Лаборатории-на-Чипе / Е. А. Смирнов // XXVIII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием)

3. Kent S. B. H. Fundamental aspects of SPPS and green chemical peptide synthesis //Journal of Peptide Science. – 2025. – Т. 31. – №. 5. – С. e70013.

ГИБРИДНО – ИНТЕГРИРОВАННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ НА ЧИПЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОРАКОВЫХ ПРЕПАРАТОВ.

Соловян Д.И.¹, Зими́на Т.М.¹, Фёдоров В.С.²

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)*

²*Институт цитологии РАН*

Аннотация. В работе представлена разработка гибридно-интегрированной микрофлюидной системы «рак-на-чипе» (РнЧ) для оценки эффективности противораковых препаратов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от классических трудоемких моделей (чашки Петри, лабораторные животные) к персонализированным методам тестирования лекарственных средств. Изготовлен лабораторный макет чипа, состоящий из четырех полимерных слоев, сформированных методом лазерной абляции. Разработано считывающее устройство с камерой микроскопа (увеличение $\times 200$). Предложенный подход демонстрирует перспективность для исследования лекарственной резистентности и подбора индивидуальной противораковой терапии.

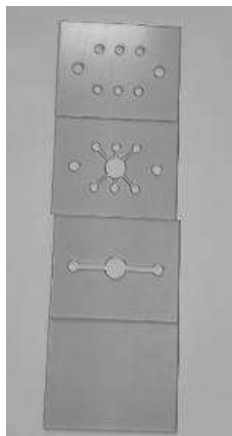
Ключевые слова: лаборатория–на–чипе, микрофлюидика, персонализированная терапия, тестирование *in vitro*

Гибридно – интегрированные лаборатории-на-чипе (ГИЛнЧ) находят все более широкое применение в решении проблем биомедицины. Актуальными проблемами биомедицинского анализа являются исследование эффективности противораковых лекарственных препаратов и резистентности раковых клеток к лекарственными препаратами. Причем особенностью современного уровня решения данной проблемы является исследование эффективности препарата именно для конкретного пациента при назначении противораковой терапии, эффективной относительно заболевания именно данного пациента [1].

Классический подход в исследовании эффективности противораковых препаратов – это культивирование тканей в чашках Петри с последующим исследованием культур, или прививка опухоли лабораторным животным с последующим испытанием препаратов. Оба подхода являются трудоемкими и ограничено релевантными, второй подход также является неприемлемым с точки зрения гуманизма [2].

Перспективным подходом является гибридизация элементов микросистемной техники и биологических тканей при создании, так называемых, систем «орган-на-чипе», или более конкретно «рак-на-чипе» (РнЧ). Такая гибридная система содержит микроемкость (микро- чашку Петри) для культивирования ткани злокачественной опухоли, микрофлюидные каналы для доставки питательной среды и лекарственных препаратов, каналы или нанопористые мембраны для доставки газовых сред, сенсорные элементы для мониторинга температуры, давления, pH и других параметров, оптические окна для визуализации процессов [3].

В данной работе изготовлен лабораторный макет РнЧ на основе 4-х слойной конструкции, выполненной из полимерных листов ПММА толщиной 1,5 мм, из которых нижний слой является базой, второй слой содержит углубление комплементарное с ростовой емкостью, третий слой содержит систему микрофлюидных каналов и четвертый верхний слой, содержит отверстия для входа и выхода жидких компонентов. Слои выполнены методом лазерной абляции на приборе Zareff. Спекание произведено при температуре 120 °С и давлении 17 кПа. Охлаждение изделия занимало 1 час. Макет представлена на рис. 1.



1



2

Рис. 1. Макет микрофлюидной системы «рак-на-чипе». 1 – слои ПММА, обработанные технологией лазерной абляции; 2 – собранный лабораторный макет РнЧ.

Система РнЧ имеет считывающее устройство, содержащее платформу, комплементарную чипу, освещение снизу, камеру микроскопа с увеличением X200. Считывающее устройство представлено на рис. 2.



1



2

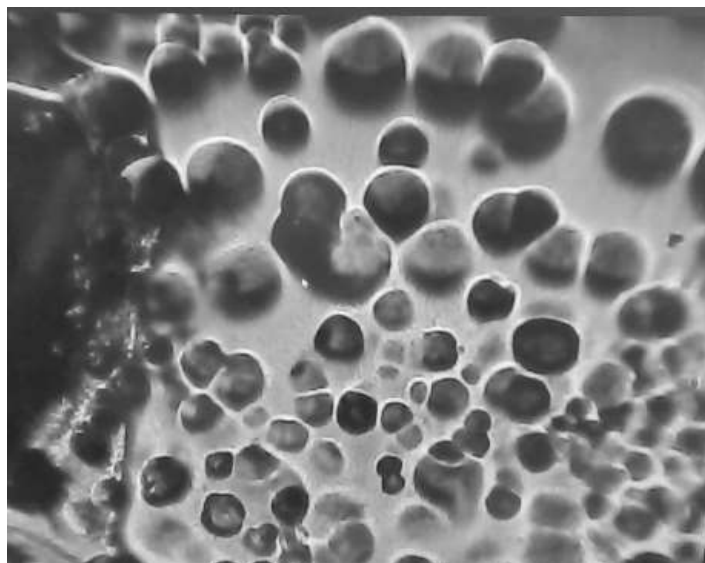
Рис. 2. Считывающее устройство. 1 – считывающее устройство со встроенной камерой микроскопа. 2 – чип на комплементарной ему платформе с освещением.

Испытания системы проведены с помощью культур дрожжей.

На рис. 3 показано исследование жизнеспособности дрожжей после воздействия модельного препарата натимицина.



1



2

Рис. 2. Исследование жизнеспособности культур дрожжей. 1 – работающее устройство; 2 – анализируемое изображение, полученное с помощью системы РнЧ.

Жизнеспособность была изучена воздействием Coomassie brilliant blue, который проникает в клетку и окрашивает ее в синий цвет при потере жизнеспособности клетки, когда ее оболочка теряет герметичность.

По итогам проведенной работы была создана гибридно – интегрированная лаборатория на чипе, на основе четырёхслойной полимерной конструкции, сформированной методом лазерной абляции. Предложенное устройство позволяет интегрировать культивирование опухолевой ткани, доставку питательных сред и лекарственных препаратов, а также оптический мониторинг процессов в реальном времени.

Список литературы

1. Leung, C.M., de Haan, P., Ronaldson-Bouchard, K. et al. A guide to the organ-on-a-chip. Nat Rev Methods Primers 2, 33 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00118-6>
2. Cognetti, J.S.; Miller, B.L. Real-Time, Continuous Monitoring of Tissue Chips as an Emerging Opportunity for Biosensing. Sensors 2025, 25, 5153. <https://doi.org/10.3390/s25165153>
3. Hughes, A. M., Kolb, A. D., Shupp, A. B., Shine, K. M., and Bussard, K. M. (2021). Printing the pathway forward in bone metastatic cancer research: Applications of 3D engineered models and bioprinted scaffolds to recapitulate the bone-tumor niche. Cancers (Basel) 13 (3), 507. doi:10.3390/cancers13030507

О КРИТЕРИИ БЕЗДИСЛОКАЦИОННОГО РОСТА В МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ INGAASP/INP

СОРОКИН Д.С., ГРИШИН А. Е., СМАРАГДОВ Д.С.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Аннотация. Проведены исследования эффективного скалывающего напряжения для светоизлучающих гетероструктур InGaAsP/InP, работающих на длине волны 1.55 мкм, с активной областью на основе чередующихся напряженных КЯ (от 1 до 9 шт) и изопериодных барьеров

различной толщины при температуре эпитаксии. Проведена количественная оценка упругих напряжений с использованием трех моделей компенсации механических напряжений при двух величинах параметра ядра дислокации. Показано, что выбор модели и параметра ядра дислокации является критичным при данных деформациях. Достижение бездислокационного роста возможно для обеих толщин барьера в рамках подхода эффективного скалывающего напряжения, в структурах, включающих не более 4 КЯ.

Ключевые слова: критическая толщина псевдоморфного роста, многослойные гетероструктуры, напряженные квантовые ямы, InGaAsP, подложка InP, полупроводниковые лазеры, 1.55 мкм.

Введение

Изготовление лазерных гетероструктур с улучшенными характеристиками стало возможно за счет стремительного развития технологии эпитаксиального роста. Возможность изготовления тонких пленок с фиксированным составом и прецизионной толщиной стимулировало исследователей рассмотреть все преимущества рассогласованных по параметру решетки осаждаемого материала и подложки. С начала 80-х годов прошлого столетия были опубликованы основополагающие работы по контролю и прогнозированию механических напряжений в гетероструктурах на основе напряженной активной области [1-2]. Мэттьюз и Блэксли предложили два подхода: энергетический и механический. Обе модели рассматриваются с точки зрения получения некоторой толщины слоя, при которой не наблюдается генерации дислокаций несоответствия (ДН). Однако, за пределами этой толщины существует вероятность генерации большой плотности ДН и прорастающих дислокаций (ПД). Для решетки сфалерита, которая характерна для всех АЗВ5 полупроводниковых соединений, ПД скользят вдоль плоскости скольжения (111) в направлении $\langle 011 \rangle$, как бы пронизывая всю гетероструктуру, образуя новые сегменты ДН и дислокационные петли. Образование таких протяженных дефектов способствует резкому ухудшению выходных оптических и электронных характеристик приборов, поэтому дальнейшее развитие напряженных эпитаксиальных пленок связано с различными модификациями этих двух моделей с целью контроля процесса дефектообразования.

В дальнейшем было показано, что обе модели являются эквивалентными друг другу [3]. Однако, предпочтение было отдано механическому балансу сил, поскольку она является более наглядной, а также в некоторых модификациях она способна учитывать кинетику образования ДН. Еще одним развитием данной модели послужила модель эффективного скалывающего напряжения, в которой силы, действующие на единицу длины дислокации в модели Мэттьюза и Блэксли, заменяются на скалывающие напряжения. Скалывающее напряжение получается за счет поворота двусосного «плоского» напряжения вдоль плоскости скольжения 60° дислокации. При этом данная модель является удобной для исследования, поскольку она позволяет провести анализ всей активной области в приближении квазиоднородного слоя.

В предыдущей работе [5] были получены результаты для InGaAlAs/InP с длиной волны 1300 нм (соответствующей О-диапазону). В настоящей работе была выполнена оценка эффективного скалывающего напряжения для многослойных лазерных гетероструктур с активной областью на основе нескольких напряженных КЯ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($\lambda = 1.55$ мкм) и изопериодных барьеров на основе четверных соединений $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, выращиваемых на подложках InP(001) для С-диапазона. Также было проведено исследование влияния различных факторов на значение эффективного скалывающего напряжения и определено максимальное количество КЯ, обеспечивающих режим псевдоморфного роста. Данное исследование является важным для оценки бездислокационного роста

активной области с улучшенными характеристиками для волоконно-оптических линий связи.

Исходные данные для расчета

В данной работе ограничимся рассмотрением активной области лазера, поскольку эмиттеры и волноводы являются согласованными по периоду решётки с подложкой InP. В таком случае для расчёта эффективного скалывающего напряжения можно ограничиться анализом активной области, начиная с первой КЯ. Схематическое представление эквивалентной планарной гетероструктуры, используемой для моделирования, показано на рис. 1.

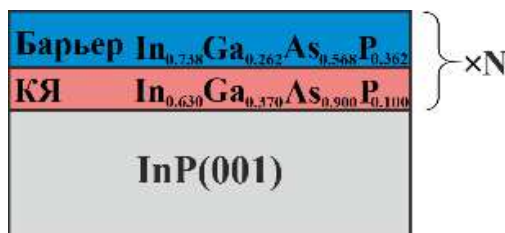


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры, используемой для моделирования

Параметры для бинарных соединений, используемые в расчётах, приведены в табл. 1. Толщину и состав КЯ фиксировали ($\lambda=1.55$ мкм), а толщину изопериодных к подложке барьеров (h_b) варьировали в диапазоне от 10 до 50 нм. Составы и толщины КЯ и барьерных слоев приведены в табл. 2 [6]. Температура эпитаксии была выбрана равной $T=923$ К. Для оценки модель эффективного скалывающего напряжения (ЭСН) (τ_{eff}) [4], которая является движущей силой распространения ПД в напряженных слоях толщиной h . Она применима для многослойных структур и определяет граничный слой, в котором отсутствуют условия для формирования ДН. Начало образования ДН соответствует условию $\tau_{eff} > 0$.

$$\tau_{eff} = S \frac{2G(1+\nu)}{(1-\nu)} \varepsilon_{eq} - \frac{Gb(1-\nu \cos^2 \varphi) \cos \theta}{4\pi h(1-\nu)} * \left[\ln \left(\frac{\beta h_c}{b} \right) + 1 \right], \quad (2)$$

где S – фактор Шмидта ($S = \sqrt{2/3} \cdot 0.5 \approx 0.408$) [8], θ – угол между плоскостью скольжения и нормалью к интерфейсу ($\theta \approx 35.26^\circ$). В случае эпитаксиального роста кристаллов со структурой алмаза или сфалерита (цинковой обманки) на подложках с ориентацией (001) модуль сдвига (G) и коэффициент Пуассона (ν) выражаются следующим образом: $G = (c_{11} - c_{12}) / 2$ и $\nu = c_{12} / (c_{11} + c_{12})$. При определении параметров твердых растворов использовалась линейная аппроксимация Вегарда. Эквивалентную деформацию (ε_{eq}) в уравнении (2) было определено тремя разными подходами: методом среднего параметра решётки (Average Lattice Method — ALM), методом усреднения по толщине (Thickness Weighted Method — TWM) и методом нулевого напряжения (Zero Stress Method — ZSM) ($Y_i = c_{11} + c_{11} - 2c_{12}^2 / c_{11}$) [7].

$$\varepsilon_{ALM} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i h_i}{\sum_{i=1}^N h_i}; \quad \varepsilon_{TWM} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i Y_i h_i}{\sum_{i=1}^N Y_i h_i}; \quad \varepsilon_{ZSM} = \frac{\varepsilon_1 Y_1 h_1 + \sum_{i=2}^N \varepsilon_i Y_i h_i (a_1 / a_i)}{Y_1 h_1 + \sum_{i=2}^N Y_i h_i (a_1 / a_i)} \quad (3)$$

Таблица 1.

Свойства используемых соединений A^3B^5 .

Соединение	Период решетки a , Å	$a_{th} 10^6$, К ⁻¹	C_{11} , 10^{10} Н/м ²	C_{12} , 10^{10} Н/м ²	G , 10^{10} Н/м ²	ν
GaAs	5.6533	5.73	11.88	5.38	3.250	0.31
InAs	6.0583	4.56	8.33	4.53	1.902	0.35
InP	5.8690	4.58	10.22	5.73	2.245	0.36
GaP	5.4508	4.80	14.05	6.20	3.925	0.30

Таблица 2.

Параметры слоев гетероструктуры, используемые при расчете.

Слой	x (Ga)	y (As)	h_{min} , нм	h_{max} , нм	N (число КЯ, барьеров)	f_0 , %
КЯ	0.370	0.900	5		<10	0.041
Барьеры	0.262	0.568	10	50		-0.004

Результаты и обсуждение

Для оценки τ_{eff} был рассмотрен параметр ядра дислокации (β), чья величина варьируется в различных работах. Мы использовали несколько значений параметра ядра дислокации для расчетов $\beta=2.05$ [4] и $\beta=4$ [8] входящее в выражение $[\ln(\beta h_c / b) + 1]$.

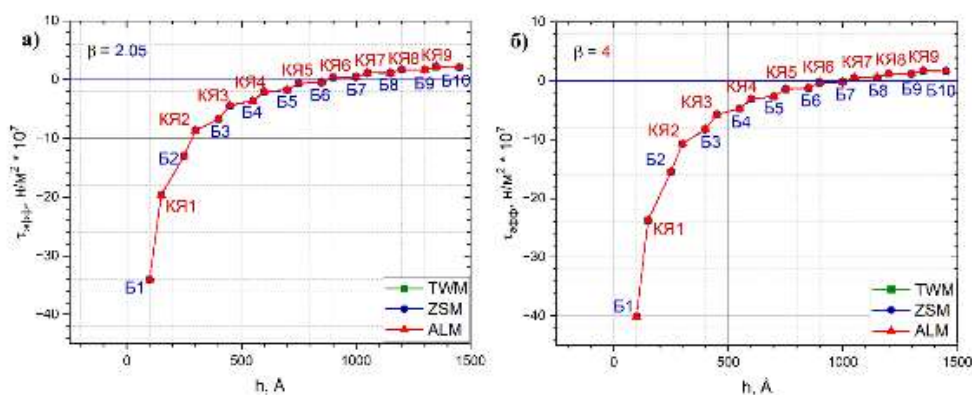


Рисунок 2 – зависимость эффективного скалывающего напряжения при $h_b=10$ нм, $\beta=2.05$ (а), $\beta=4$ (б)

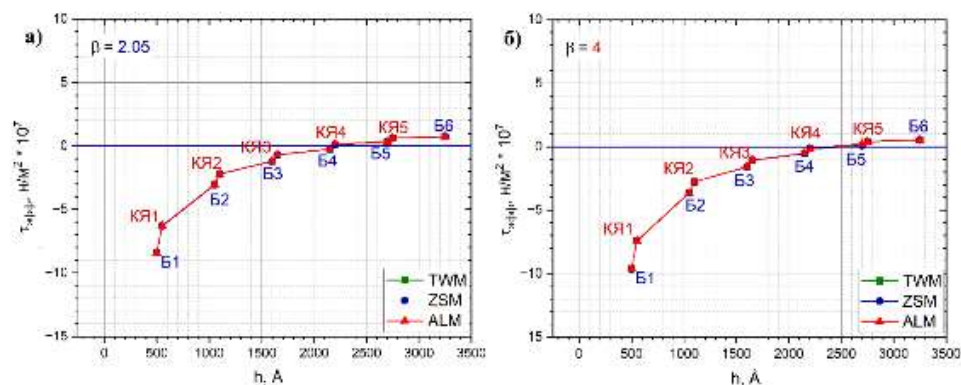


Рисунок 3 – зависимость эффективного скалывающего напряжения при $h_b=50$ нм, $\beta=2.05$ (а), $\beta=4$ (б)

Анализ полученных результатов (рис. 2 и 3) согласно модели эффективного скалывающего напряжения демонстрирует важность учета корректного параметра ядра дислокации, что может быть крайне важно при изготовлении активной области лазера с множественными КЯ. При толщине барьера 10 нм вероятность образования ДН ($\tau_{\text{eff}} > 0$) резко возрастает в начале роста КЯ6 при $\beta = 2.05$ ($\tau_{\text{eff}} = 0.38 \cdot 10^7$ Н/м²), в то время как при $\beta = 4$ $\tau_{\text{eff}} < 0$ ($\tau_{\text{eff}} = -0.29 \cdot 10^7$ Н/м²). При толщине барьера 50 нм тенденция сохраняется, но возможность роста КЯ высокого кристаллического совершенства снижается до четырех КЯ для $\beta = 4$ ($\tau_{\text{eff}} = -0.16 \cdot 10^7$ Н/м²) и до трех КЯ в случае $\beta = 2.05$ ($\tau_{\text{eff}} = -0.69 \cdot 10^7$ Н/м²). Важно подчеркнуть, что критерий $\tau_{\text{eff}} > 0$ не способствует немедленной генерации большой плотности ДН, поскольку в реальных процессах эпитаксиальный рост происходит в неравновесных условиях. Отмечается, что заметное ухудшение структурных и оптических характеристик наступает при превышении критических параметров по модели Мэттьюза — Блэкли, в 2–3 раза [9]. Можно отметить, что подбор и выбор параметра ядра дислокации в данной модели является нумератором, что лимитирует его подгонку без экспериментальных образцов, выращенных в одной ростовой камере реактора.

Толщина барьеров также влияет на максимально допустимое количество КЯ в активной области. Как уже отмечалось ранее, при фиксированных толщине и составе КЯ возможность роста определенного количества КЯ ограничивается толщиной барьерных слоев, поскольку, согласно формуле (3), происходит его усреднение, которое зависит от суммарной толщины квазиоднородного слоя. В таком случае при учете нового слоя учитывается суммарная аккомодация деформации предыдущего, в результате чего, в отсутствие компенсации, барьерный слой усредняет деформацию нижележащей КЯ. При этом выбор модели усреднения (3) при малых рассогласованиях ($f < 1$ %) не вносит существенного вклада в результаты. Для трех моделей абсолютная разница составляет не более 1%, чем можно пренебречь.

Заключение

Проведены расчеты эффективного скалывающего напряжения активной области лазерной гетероструктуры на основе InGaAsP/InP для С-диапазона ($\lambda = 1.55$ мкм). Показано, что количество КЯ лимитируется внутренними механическими напряжениями из-за неизбежной аккомодации деформации. Величина параметра ядра дислокации также вносит существенный вклад в величину эффективного скалывающего напряжения. Выбор модели усреднения деформации (3) не является критичным при малых рассогласованиях слоя и подложки. Результаты работы могут быть полезны при проектировании источников излучения для волоконно-оптических линий связи.

Список литературы

1. Matthews J.W., Blakeslee A.E. Defects in epitaxial multilayers // J. Cryst. Growth 1974. V.27. PP.118-125.
2. Matthews J.W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V.12. No.1 PP.126-133.
3. Jain S.C., Harker A.H., Cowley R.A. Misfit strain and misfit dislocations in lattice mismatched epitaxial layers and other systems // Phil. Mag. A. 1997. V.75. No.6. PP.1461-1515.
4. Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Чикичев С.И. Кремний-германиевые эпитаксиальные пленки: физические основы получения напряженных и полностью релаксированных гетероструктур // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 7. С. 689-715.

5. Сорокин Д.С., Гришин А.Е. Проблема оценки критической толщины в многослойных гетероструктурах с напряженными квантовыми ямами InGaAlAs/InP // XIII Всероссийская Научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего». 2025. Т. 3. С. 189-194.
6. Qing Ke, Shaoyang Tan, Dan Lu, Ruikang Zhang, Wei Wang, Chen Ji. High power 1550 nm InGaAsP/InP lasers with optimized carrier injection efficiency. // 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) 2015. C 1-3.
7. Ekins-Daukes N.J., Kawaguchi K., Zhang J. Strain-balanced criteria for multiple quantum well structures and its signature in X-ray rocking curves // Crystal Growth & Design. 2002. V.2. No. PP.287-292.
8. Rudinsky M.E., Karpov S.Yu., Lipsanen H., Romanov A.E. Critical thickness and bow of pseudomorphic In_xGa_{1-x}As-based laser heterostructures grown on (001)GaAs and (001)InP substrates. Materials Physics and Mechanics. 2015. V.24. No.3. PP. 278-283.
9. Bennett B.R., del Alamo J.A. Mismatched InGaAs/InP and InAlAs/InP heterostructures with high crystalline quality // J. Appl. Phys. 1993. V.73. No.7. PP. 3195-3202.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ SiC-СТРУКТУР СО СВЕРХТОНКИМИ И СВЕРХТОЛСТЫМИ СЛОЯМИ

СУББОТИНА А.С.^{1,2}, ПАНОВ М.Ф.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт «Электронстандарт»*

Аннотация. В публикации приводится сравнительный анализ обработки экспериментальных и моделированных спектров отражения многослойных эпитаксиальных структур на основе SiC, благодаря физическим свойствам одного из наиболее распространенных материалов для создания ЭКБ экстремальной и силовой электроники, содержащих слои толщинами от 0,5 до 50 мкм, – близких к предельным для данного метода.

Ключевые слова: спектр, отражение, Фурье-преобразование, карбид кремния.

Введение

Значения толщины слоя, которые могут быть обнаружены методом ИК Фурье-спектроскопии и последующего частотного анализа спектра [1], теоретически ограничены длиной когерентности излучения для сверхтолстых слоев, и шириной наблюдаемого диапазона (т.е. областью непрерывной прозрачности материала) для сверхтонких слоев. В разрезе практических исследований определяемые толщины ограничены спектральным разрешением измерений, ухудшением соотношения сигнал/шум в области значения волнового числа более 6000 см⁻¹, уменьшением амплитуды интерференционных колебаний при увеличении толщины слоя. Следовательно, существуют оптимальные значения области и шага сканирования, дальнейшее улучшение которых, больше не приведет к улучшению итогового результата. Оптимальными условиями мы предлагаем считать диапазон измерения спектра отражения от 1500 до 6500...7000 см⁻¹ с шагом 4 см⁻¹. Для таких условий сканирования диапазон толщин, вычисленный по формуле $d = m/(2n\Delta k)$, где m – количество максимумов в спектральном диапазоне Δk , составляет от 0,1 до 130 мкм.

Материалы и методы.

Анализировались трехслойные эпитаксиальные структуры 4H-SiC, выращенные на карбидокремниевых подложках, того же политипа. Технологические данные об образцах

приведены в таблице. (Номера слоев считались от подложки.) Экспериментальные спектры отражения были получены с помощью Фурье-спектрометре Nikolet6700 в спектральном интервале $60 \dots 6500 \text{ см}^{-1}$ с шагом 4 см^{-1} . При построении расчетных спектров использовалась диэлектрическая функция:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} \left(\frac{\omega_l^2 - \omega^2 + i\gamma_l}{\omega_t^2 - \omega^2 + i\gamma_t} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_p)} \right),$$

где $\varepsilon_{\infty} = 6,78$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; ω – волновое число, см^{-1} ; $\omega_l = 966.4 \text{ см}^{-1}$ и $\omega_t = 797 \text{ см}^{-1}$ – частоты продольных и поперечных оптических фононов; γ_l и γ_t – коэффициент затухания продольных и поперечных фононов, см^{-1} ; ω_p – частота плазмонного резонанса, см^{-1} ; γ_p – коэффициент затухания колебаний плазмонов, см^{-1} . (Значения даны для 4H-SiC [2]). Приведенная формула аддитивно учитывает однофононное поглощение и плазмонный резонанс. Изменение концентрации учитывались изменением частоты плазмонного резонанса. Подробно метод математического моделирования описан в [1].

Существенными отличиями моделированного и экспериментальных спектров являются: возможность существенного увеличения разрешения и отсутствие искажений, не связанных с характеристиками образцов при получении моделированного спектра.

Обработка полученных зависимостей проводилась с использованием программного пакета LabView и включала интерполяцию данных спектра, удаление линии тренда, связанной с небольшой зависимостью коэффициента преломления от частоты в области нормальной дисперсии, и последующее Фурье-преобразование выбранного участка спектра. Диапазон для обработки выбирался так, чтобы в него, по возможности, попало целое число полупериодов интерференционных колебаний и избежать появления ложных пиков в Фурье-образе спектра.

Результаты и обсуждение.

Результаты эксперимента приведены в таблице. Для всех образцов обнаруженное число слоев соответствует технологическим данным, при этом абсолютная погрешность измерений в большинстве случаев не превышает 1 мкм. Стоит отметить, что переход между слоями с существенно различающимися уровнями легирования может происходить с образованием нескольких более тонких подслоев с промежуточной концентрацией носителей. Это обстоятельство может служить объяснением высокой погрешности, наблюдаемой при определении толщины 1 слоя образца 1 и 3 слоя образца 2.

Во всех случаях наиболее точно из экспериментальных спектров удалось определить толщины верхних слоев. Такая тенденция отсутствует при обработке моделированных спектров и предположительно связана с уменьшением интенсивности отраженного от нижних слоев излучения вследствие поглощения выше лежащими слоями.

Сравнение результатов анализа экспериментального и моделированного спектров подтверждает, что ограничение максимальной определяемой толщины связано с разрешением прибора. Другим существенным отличием экспериментального спектра является уменьшение амплитуды колебаний, связанных с толстыми слоями, в сравнении с результатами моделирования. Таким образом, значение в 50 мкм близко к предельно достижимому для данного метода.

Толщины 2 и 3 слоев второго образца находятся в комфортном для измерения диапазоне от 1 до 5...10 мкм, что позволило получить корректный результат. Увеличение погрешности при определении из экспериментального спектра толщины верхнего слоя второго образца (как определяемой непосредственно) ассоциируется с полной длиной анализируемого спектра, увеличение которой не целесообразно из-за уменьшения соотношения сигнал/шум при значениях более 5000 см^{-1} .

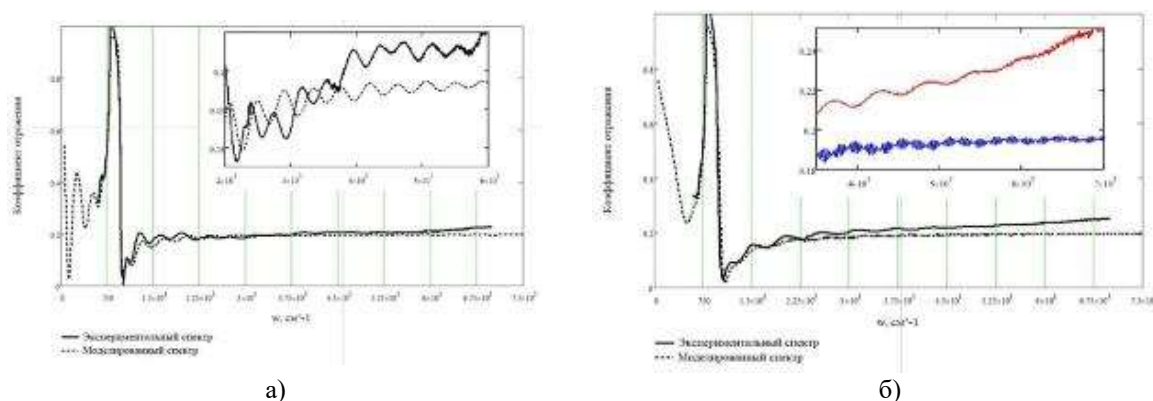


Рис. 1. Исходные спектры образцов а) образец 2, б) образец 1

Анализ образца 3, два верхних слоя которого являются сверхтонкими ($<1\text{ мкм}$) показывает, что из-за ограниченности диапазона сканирования, получить достоверные данные для толщин таких слоев не представляется возможным и метод применим исключительно для качественной оценки. При этом высокая погрешность определения толщины слоя 1 связана с искажением суммарной толщины образца.

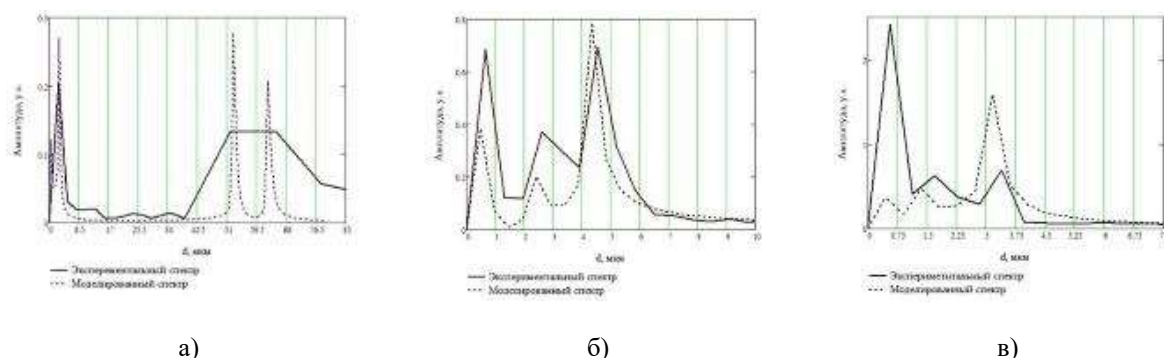


Рис. 2. Результаты Фурье-преобразования: а) образец 1, б) образец 2, в) образец 3

Таблица 1

Номер образца	Номер слоя	Тип проводимости	Концентрация примеси, см^{-3}	Толщина				
				Технологическая	Экспериментальный спектр		Моделированный спектр	
				d , мкм	d , мкм	δ , %	d , мкм	δ , %
1	3	n	$>1 \cdot 10^{19}$	3	3	-	2.99	0.3
	2	n	$<5 \cdot 10^{16}$	50	49	2	49.8	0.4
	1	p	$1 \cdot 10^{19}$	10	13	30	9.95	0.5

2	3	p	$>1 \cdot 10^{19}$	0.5	0.651	30.2	0.485	3
	2	p	$5 \cdot 10^{16}$	2	1.95	2.5	1.94	3
	1	n	-	1.9	1.95	2.6	1.94	2.1
3	3	p	$>1 \cdot 10^{19}$	0.6	0.567	5.5	0.46	23.3
	2	p	$3 \cdot 10^{17}$	0.7	1.13	61	0.9	28.5
	1	n	-	1.9	1.7	10.5	1.7	10.5

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют, что использование метода инфракрасной Фурье-спектроскопии для определения толщин эпитаксиальных слоев многослойных SiC структур позволяет получить точные значения с относительной погрешностью менее 3 % в случае, если все они попадают в диапазон от 1 до 50 мкм и может быть использован для качественного детектирования за пределами указанного диапазона.

Список литературы

1. Оптический контроль параметров подложек и эпитаксиальных структур карбида кремния / В.В.Лучинин, М.Ф.Панов, М.В.Павлова, Ф.Е.Рыбка. – Текст: непосредственный // Известия ВУЗов. Сер. Электроника. – 2022. – Т.27. – № 2. – С.175–186.
2. Characterization of carrier concentration and mobility in n-type SiC Wafers using infrared reflectance spectroscopy / K.Narita, Y.Hijikata, H.Yaguchi, S.Yoshida, S.Nakashima. – Text: unmediated // Japanese Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol.43. – Issue 8A. – P.5151–5156.

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НАБОРА ДАННЫХ ПРИ СПИРАЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ

ТИМОФЕЕВ А.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Данная статья посвящена разработке и программной реализации алгоритма набора данных при спиральной томографии. В работе рассматриваются принципы взаимодействия аппаратных компонентов томографической системы таких как система перемещений, источник излучения, детектор и электромагнитные реле, а также средства, применяемые при разработке управляющего программного обеспечения. Представлены структура разработанного алгоритма в виде блок-схемы и архитектура программной части в виде UML-диаграмм взаимодействия компонентов системы.

Ключевые слова: спиральная томография, алгоритм набора данных, проекционные данные

Введение

В современных задачах неразрушающего контроля и промышленной дефектоскопии спиральная томография обеспечивает получение объёмных изображений исследуемых объектов с высоким пространственным разрешением. Качество реконструированного изображения напрямую определяется корректностью набора проекционных данных, что предъявляет высокие требования к алгоритму управления томографической установкой и синхронизации её компонентов. Ручное управление процессом съёмки является

трудоёмким и не позволяет обеспечить воспроизводимость результатов, особенно при сложных траекториях сканирования.

Ключевыми элементами используемой лабораторной томографической установки являются: рентгеновская трубка БС-16 в составе моноблока РАП-150, плоскопанельный детектор производства НИПК «Электрон» с чувствительной областью 43×43 см, система перемещений на основе моторизированных линейных трансляторов и поворотных манипуляторов, а также узел релейного управления электромагнитными тормозами вертикальных осей. В данной работе представлен разработанный алгоритм набора данных при спиральной томографии, обеспечивающий синхронизацию перечисленных компонентов, а также его программная реализация в виде управляющего программного обеспечения.

Аппаратно-программные средства томографической установки

На базе кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) была разработана лабораторная томографическая установка (рис. 1), предназначенная для проведения рентгенографических и томографических работ в области неразрушающего контроля. Установка представляет собой совокупность аппаратных компонентов, управляемых единым программным обеспечением: источника рентгеновского излучения, детектора, системы перемещений и узла релейного управления.

В качестве источника излучения применяется микрофокусная рентгеновская трубка БС-16 в составе моноблока РАП-150 с диапазоном анодного напряжения 50 – 150 кВ и размером фокусного пятна менее 5 мкм. Регистрация излучения осуществляется плоскопанельным детектором производства НИПК «Электрон» с активной зоной 430х430 мм и размером пикселя 140 мкм, обеспечивающим формирование цифровых проекционных изображений высокого разрешения. Система перемещений построена на основе моторизированных линейных трансляторов, шарико-винтовых передач и поворотных манипуляторов, обеспечивающих независимое позиционирование объекта, источника и детектора, а также равномерное вращение объекта вокруг вертикальной оси в процессе сканирования. Узел релейного управления служит для управления электромагнитными тормозами вертикальных осей системы перемещений, предотвращая нежелательные смещения подвижных элементов под действием силы тяжести.



Рис. 1. Промышленный микрофокусный рентгеновский томограф

Все аппаратные узлы подключены к управляющему персональному компьютеру по интерфейсу Ethernet. Обмен командами осуществляется по протоколу TCP, выбор которого обусловлен гарантированной доставкой данных, что является важным свойством при управлении реальным оборудованием в процессе съёмки. Для каждой команды каждого узла формируется специализированная структура данных (рис. 2), которая в виде массива байтов передаётся через сокетное соединение. Управление каждым компонентом реализовано через соответствующий программный интерфейс на языке C++.

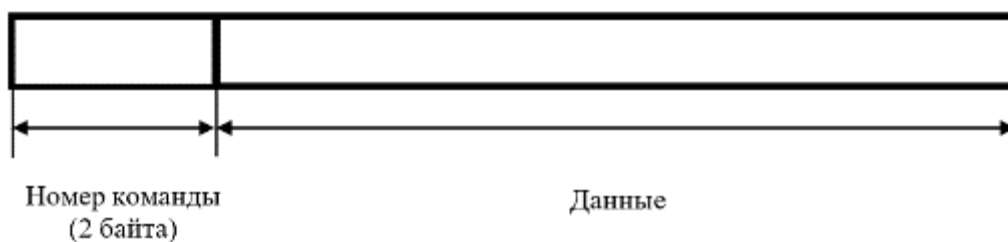


Рис. 2. Структура пакета данных

Программная реализация алгоритма набора данных

В рамках данной работы разработано программное обеспечение для управления томографической системой и реализации алгоритма набора проекционных данных при спиральной схеме съёмки. В качестве основного языка программирования используется C++, что обусловлено его высокой производительностью, поддержкой объектно-ориентированного программирования и возможностью интеграции с низкоуровневыми модулями управления оборудованием. Для разработки графического пользовательского интерфейса и организации взаимодействия между программными компонентами применяется фреймворк Qt, обеспечивающий модульную архитектуру и удобный механизм сигналов и слотов.

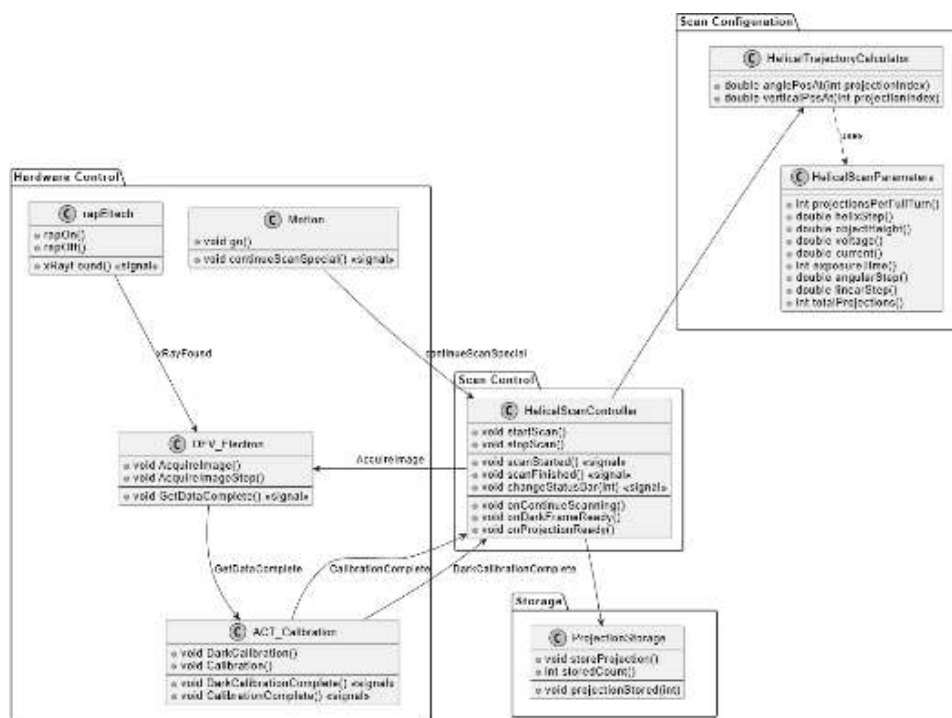


Рис. 3. UML-диаграмма модуля набора проекционных данных

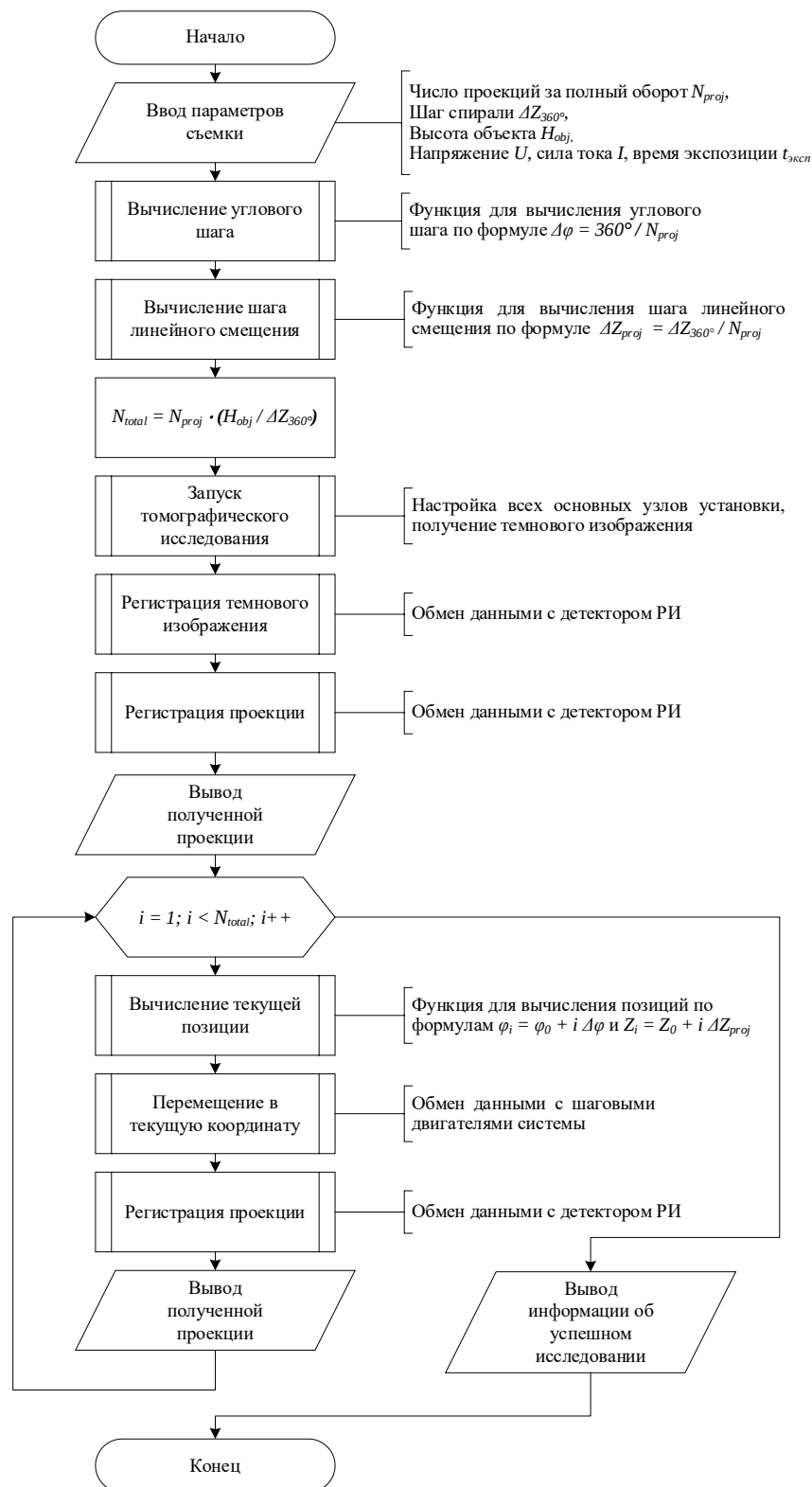


Рис. 4. Блок-схема алгоритма набора проекционных данных при спиральной компьютерной томографии

Архитектура разработанного программного модуля представлена на UML-диаграмме (рис. 3) и включает три подсистемы. Подсистема «Hardware Control» содержит ранее реализованные классы управления аппаратными узлами: rapEltech (источник излучения), Motion (система перемещений), DEV_Electron (детектор), ACT_Calibration (калибровка

детектора). Подсистема «Scan Configuration» включает класс HelicalScanParameters, хранящий параметры спирального сканирования, и класс HelicalTrajectoryCalculator, вычисляющий угловые и вертикальные координаты объекта для каждой проекции. Центральным элементом подсистемы «Scan Control» является класс HelicalScanController, координирующий работу всех компонентов в процессе съёмки. Класс ProjectionStorage обеспечивает сохранение полученных проекционных изображений.

Алгоритм набора данных представлен на рис. 4. На подготовительном этапе выполняется калибровка детектора и задание параметров съёмки. Затем включается рентгеновское излучение и разблокируются электромагнитные тормоза вертикальных осей. В процессе сканирования синхронно выполняются вертикальное перемещение объекта и его вращение. По сигналу continueScanSpecial от класса Motion инициируется регистрация очередной проекции детектором, после получения сигнала GetDataComplete проекция передаётся в ProjectionStorage. По завершении набора данных излучение отключается и тормоза фиксируют подвижные оси.

Список литературы

1. Шлее М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. СПб: БХВ-Петербург, 2015. 928 с.
2. Дуглас Крамер. Сети TCP/IP, том 1. Принципы, протоколы и структура. М.: «Вильямс», 2003. 880 с.
3. Qt Documentation [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://doc.qt.io>, свободный – (20.03.2026).
4. Бессонов В.Б. Программно-аппаратные комплексы для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии: дисс. док. тех. наук. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2022 – 289 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕРИНГА СЕРЕБРА ДЛЯ МОНТАЖА SiC ПРИБОРОВ.

Тиунов Д.С.; Бройко А.П.; Бохов О.С.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Аннотация. В работе представлена технология низкотемпературного синтеринга (до 300 °С) серебрясодержащих паст для монтажа кристаллов силовых карбидкремниевых (SiC) приборов [1]. С помощью специализированной оснастки — пресса для синтеринга, обеспечивающего точный контроль технологических параметров процесса, произведён монтаж SiC кристаллов для транзисторов в корпусе ТО-247. Экспериментально отработаны режимы спекания и выполнено сравнительное исследование с традиционной пайкой при монтаже SiC транзисторов [2]. Показано, что полученные соединения обеспечивают сопоставимые тепловые и электрические характеристики при потенциально более высокой надёжности в условиях термоциклирования. Полученные результаты подтверждают перспективность применения технологии синтеринга серебра для высокотемпературной силовой электроники.

Ключевые слова: Карбид кремния, синтеринг, транзистор, силовая электроника, монтаж кристаллов.

Карбид кремния (SiC) является одним из широкозонных полупроводниковых материалов, используемых для создания приборов силовой электроники благодаря сочетанию более высоких рабочих температур, электро- и теплопроводности и термической стабильности. При создании SiC-транзисторов важным этапом является выбор технологии монтажа кристаллов, чтобы обеспечить надежное соединение кристалла с подложкой. Оловосодержащие бессвинцовые припои и токопроводящие эпоксидные компаунды не могут обеспечить долговременную химическую и механическую стабильность при высоких температурах, что напрямую влияет на электрофизические свойства устройства [3].

В данной работе предлагается рассмотреть технологию синтеринга частиц серебра, как альтернативный метод монтажа кристаллов и межсоединений. Если в процессе пайки

материал переходит из одной фазы в другую при формировании соединения, что может приводить к образованию пустот из-за выделяющегося газа из компонентов флюса и плохого смачивания поверхности припоем, то при синтеринге благодаря диффузионным механизмам образуется однородный пористый слой, пористость которого в процессе снижается со временем. Модуль упругости спечённых наночастиц серебра ниже, чем у паяных соединений на основе Pb-Sn или бессвинцовых припоев, что обеспечивает хорошие термомеханические свойства при термических циклах. В то же время спечённая структура может проявлять характеристики объёмных материалов, такие как высокая температура плавления, высокая электро- и теплопроводность [4, 5].

Для реализации технологии синтеринга частиц серебра разработана технологическая оснастка - пресс для синтеринга, который может обеспечить оптимальный режим и точный контроль параметров процесса консолидации частиц. С помощью данного оборудования произведен монтаж SiC кристаллов транзисторов. После операций корпусирования по итогам технологического процесса были созданы образцы SiC-транзисторов в корпусе TO-247. Проведено сравнительное исследование полученных образцов SiC-транзисторов с образцами, выполненными с традиционной пайкой. Замер температур происходил в линейном режиме работы транзистора при различных токах открытого канала. Подключение транзистора к измерительному стенду представлено на рисунке 1.

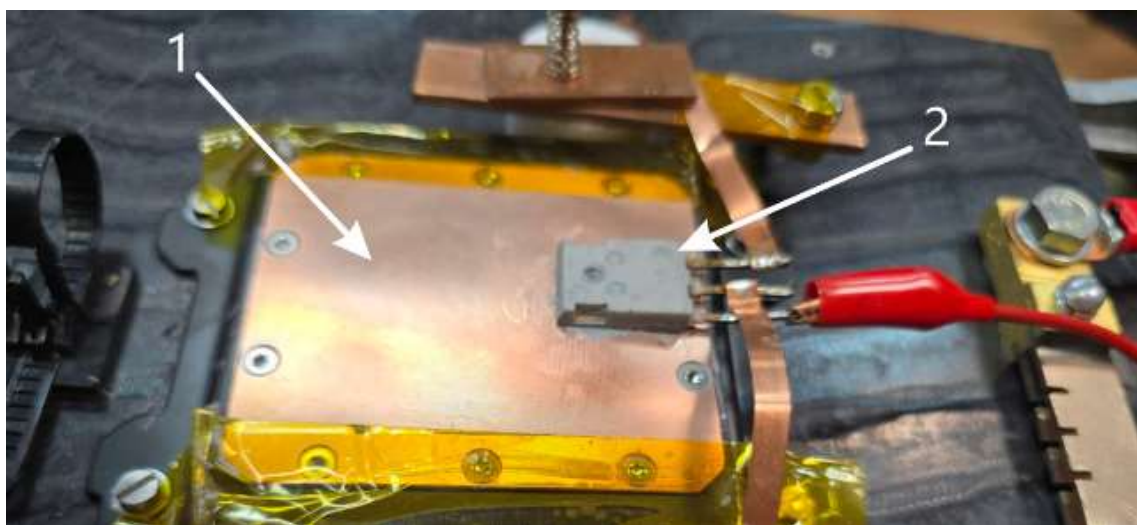


Рисунок 1 – Подключение транзистора в корпусе TO-247 к измерительному стенду: 1 – измерительный стенд, 2 – SiC-транзистор

Температура измерялась при ручном открытии и закрытии канала при подаче напряжения на затвор $V_{GS} = 18$ В. Регистрация температуры транзистора во времени происходила с помощью тепловизора (рисунок 2). На рисунке 2 представлено температурное распределение на поверхности транзистора TO-247.

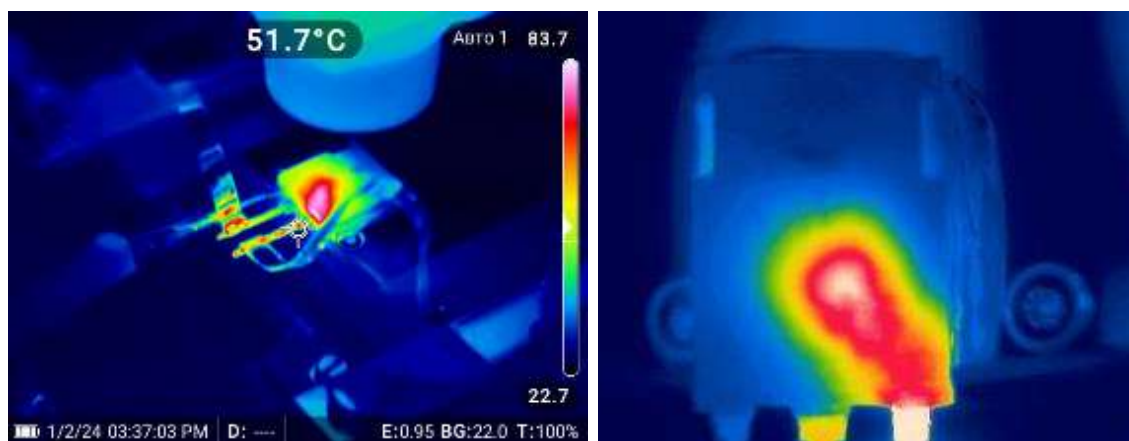


Рисунок 2 – Температурное распределение на поверхности транзистора, выполненного по технологии синтеринга

Основной зоной нагрева в транзисторе на рисунке 2 является зона вблизи кристалла и вывода на исток. Это связано с протеканием тока через алюминиевые проволоки с малой площадью поперечного сечения [6]. Максимальная температура транзистора в 100 °C достигается при токе 40 А. Дальнейшее повышение тока приводит сильному перегреву вывода на исток и плавлению припоя токопроводящей шины.

Для сравнения проведены аналогичные измерения для транзистора в корпусе ТО-247 созданного с технологией пайки. Сравнение максимальной температуры от мощности транзисторов, выполненных по разным технологиям, представлены на рисунке 3.

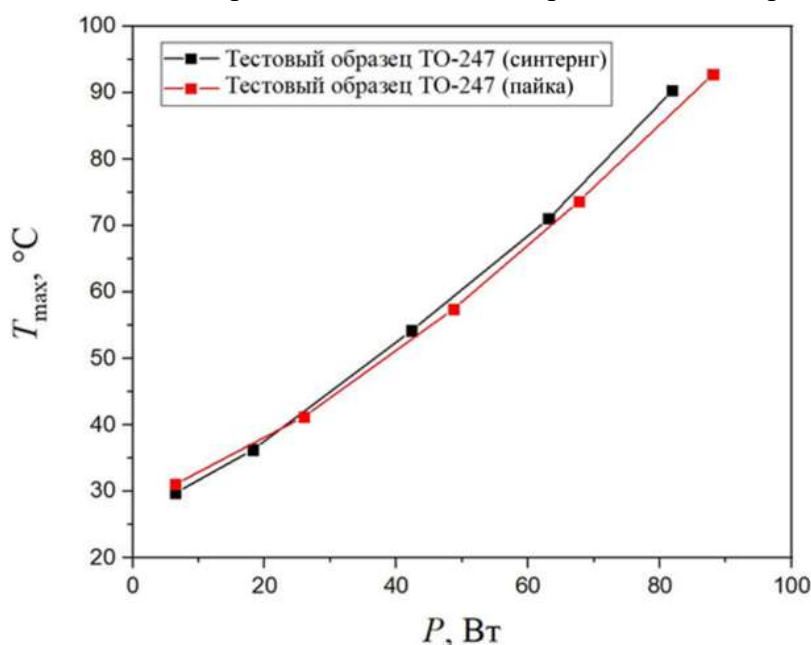


Рисунок 3 – Зависимость максимальной температуры от подаваемой мощности на транзисторы в корпусе ТО-247

Таким образом, проведённые исследования подтвердили эффективность технологии низкотемпературного синтеринга серебра, как альтернативного метода для монтажа SiC-приборов. Изготовленные по разным технологиям монтажа кристаллов SiC-транзисторы продемонстрировали близкие тепловые и электрические характеристики, однако при долговременной работе в условиях тепловых циклов данная разница становится более существенной.

Список литературы

1. В. Иванов, Ф. Уголини. Монтаж кристаллов по технологии синтеринга для производства элементов и модулей силовой электроники. Электроника НТБ. – №. 7. 2021 – С. 36-45.
2. Мишинёв М. А., О. С. Бохов, С. А. Пологов, А. Восколович, М. А. Потапов. Тепловой анализ MOSFET транзистора в корпусе ТО-247 с алмазным теплоотводом //НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО НТО РЭС ИМ. АС ПОПОВА, ПОСВЯЩЕННАЯ ДНЮ РАДИО Учредители: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). – №. 1. – С. 442-444.
3. John G. Bai, Member, IEEE, Jesus N. Calata, and Guo-Quan Lu, Member, IEEE. Processing and Characterization of Nanosilver Pastes for Die-Attaching SiC Devices. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, VOL. 30, NO. 4, OCTOBER 2007
4. Thomas GEOFFROY, Jean-Christophe RIOU, Eric BAILLY, Gilles TARRISSE, Yves BIENVENU. Influence of thermo-mechanical stress on the microstructure of sintered silver joints for microelectronics. 2015 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)
5. Vemal Raja Manikam and Kuan Yew Cheong, Member, IEEE. Die Attach Materials for High Temperature Applications: A Review. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL. 1, NO. 4, APRIL 2011
6. Na Wu, Yuxiang Li. A Review of Novel Die Attach Materials for High-Temperature WBG Power Electronic Applications. *Materials*, Volume 18, Issue 16 (August-2 2025)

МЕТОДИКА ВЫБОРА BSIM-МОДЕЛЕЙ И САПР ДЛЯ ЗАДАЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

ФЕОКТИСТОВА В.С., ПОЛЯКОВ Д.А.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина)»*

Аннотация. В данной работе рассматривается методика выбора компактных моделей и средств автоматизированного проектирования (САПР). Проведен анализ существующих моделей, в частности модели Level 1-3 и семейство BSIM. Рассмотрены уровни проектирования. Предложена методика выбора модели и САПР на основе требований к скорости, точности и доступности. Показана возможность применения разработанного подхода при выборе модели для схемотехнического моделирования

Ключевые слова: BSIM, транзистор, MOSFET, компактные модели, САПР, моделирование.

Введение

Компактные модели транзистора – это математическое описание электрических характеристик прибора, используемое в схемотехническом моделировании. Они позволяют описать поведение реального транзистора системой уравнений, которые в свою очередь описывают зависимость токов и напряжений на его выводах, что позволяет производить численный анализ электронных схем в САПР.

Выбор моделей зависит от уровня проектирования, так как для каждого уровня характерны свои требования к точности и скорости моделирования. При этом обширное разнообразие компактных моделей и САПР затрудняет выбор. На практике отсутствует четкая структура и критерии выбора, что снижает эффективность проектирования и увеличивает время моделирования.

Целью работы является разработка методики выбора BSIM-моделей и уровня САПР для различных задач микроэлектроники.

В рамках работы решаются следующие задачи:

1. Анализ моделей полевых транзисторов и уровней проектирования.

2. Определение факторов выбора и классификация.
3. Разработка методики выбора моделей и оценка её применимости.

Анализ моделей и уровней проектирования.

Основная задача компактных моделей – обеспечение точного расчёта электрических параметров схемы при допустимых вычислительных затратах.

В основе большинства моделей MOSFET первого поколения лежат уравнения тока стока от управляющих напряжений:

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Данное уравнение применяется в моделях Level 1, оно отражает идеализированное поведение длинноканального транзистора, и не учитывает множество эффектов (короткоканальные эффекты и деградация подвижности).

Также к моделям первого поколения относятся модели Level 2 и Level 3. Они учитывают большее число эффектов, но не обеспечивают достаточной точности для описания современных транзисторов.

Для более точного описания применяются модели семейства BSIM (Berkeley Short-Channel IGFET Model) – это модели 2 и 3 поколений. В зависимости от технологии используются различные версии моделей особенности, которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Классификация моделей BSIM

Модель	Тип транзистора	Область применения	Особенности
BSIM3	Планарные MOSFET	Субмикронные КМОП-технологии	Учет короткоканальных эффектов, базовая промышленная модель
BSIM4	Планарные MOSFET	Глубокосубмикронные технологии	Расширенное описание утечек, паразитных эффектов, температурных зависимостей
BSIM-SOI	SOI MOSFET	Транзисторы на изолирующей подложке	Учет изолирующей подложки, плавающего тела
BSIM-CMG	FinFET, GAA	Многозатворные транзисторы с общим управлением на затворе	Модель 3D-структуры, учет многозатворного управления каналом.
BSIM-IMG	Многозатворные MOSFET	Транзисторы с независимыми затворами	Возможность моделирования независимого управления несколькими затворами.

Модели BSIM учитывают геометрию транзистора, короткоканальные и паразитные эффекты, обеспечивая высокую точность при большей вычислительной сложности. В работе рассматривается схемотехнический уровень, где используются компактные

модели, поэтому выбор определяется требованиями к точности: упрощённые модели применяются для оценок, а BSIM – для точного моделирования.

Критерии выбора и классификация

Проведённый анализ показал, что выбор компактной модели транзистора определяется совокупностью факторов, включая точность, вычислительную сложность, доступность моделей и учёт физических эффектов. Упрощённые модели обеспечивают быстрые, но приближённые результаты, тогда как модели семейства BSIM за счёт расширенного набора параметров позволяют более точно описывать характеристики транзистора при увеличении вычислительных затрат. Критерии выбора можно разделить на технические, вычислительные и инфраструктурные.

На основе выделенных критериев предложена классификация, устанавливающая соответствие между типом транзистора, характером решаемой задачи и используемой компактной моделью.

Классификация включает три взаимосвязанных параметра:

тип транзистора (планарный MOSFET, SOI, FinFET и др.);

тип задачи (предварительный анализ, схемотехническое моделирование, высокоточный расчёт);

условия применения (требования к точности, вычислительная сложность, доступность моделей).

В соответствии с данной классификацией представлена таблица 2:

Таблица 2

Выбор моделей транзисторов в зависимости от условий применимости

Тип задачи	Требования	Рекомендуемая модель	Обоснование
Предварительный анализ	Низкая точность, высокая скорость	Level 1-3	Простые модели, быстрый расчёт при минимальной вычислительной сложности
Схемотехническое моделирование	Средняя и высокая точность	BSIM3, BSIM4	Обеспечивают точное воспроизведение электрических характеристик транзисторов
Специализированные технологии	Учет конструктивных особенностей	BSIM-SOI, BSIM-CMG, BSIM_IMG	Учет особенностей структуры транзистора
Ограниченная доступность	Ограниченные библиотеки	Level 1-3	Обеспечивают возможность моделирования при отсутствии точных моделей.

Таким образом, предложенная классификация устанавливает однозначное соответствие между характеристиками транзистора, требованиями задачи и используемой моделью, что позволяет перейти от эмпирического выбора к формализованному.

Методика

В работе предложена методика выбора транзисторной модели и уровня САПР, основанная на последовательном анализе исходных требований, типа транзистора, технологии, точности моделирования и доступности библиотек. Общая структура методики представлена на рис. 1.

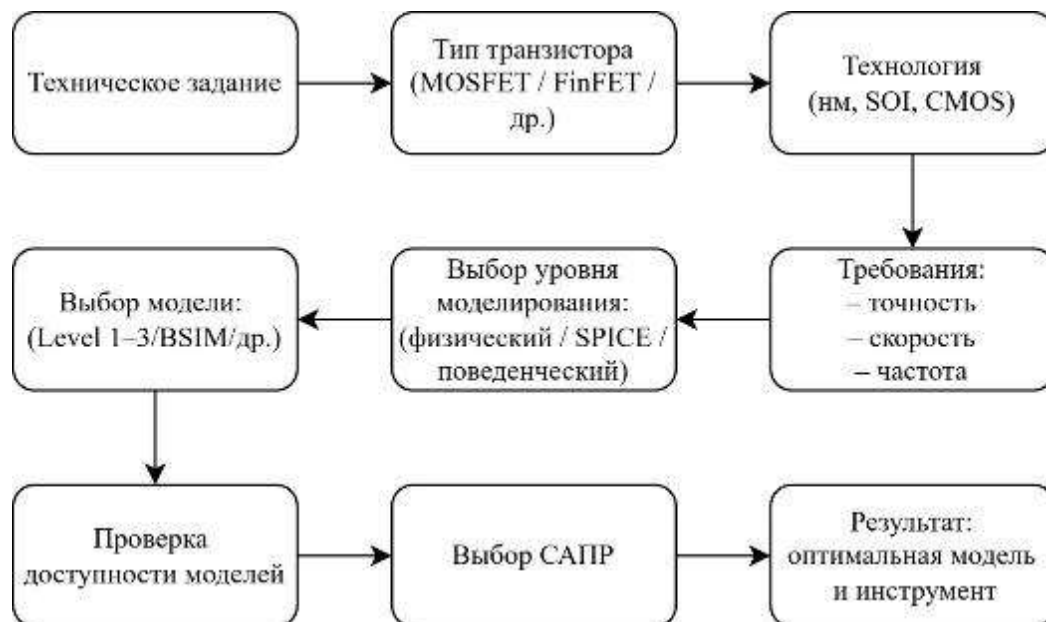


Рис. 1. Алгоритм выбора транзисторной модели и уровня САПР

Процесс выбора может быть представлен в виде зависимости:

$$M = f(T, Tech, Req, Acc, Comp, Avail)$$

где М – выбранная модель, Т – тип транзистора, Tech – технология, Req – требования задачи, Acc – точность, Comp – вычислительная сложность, Avail – доступность модели.

Предложенная методика позволяет формализовать процесс выбора транзисторной модели и обеспечить обоснованный компромисс между точностью моделирования и вычислительными затратами.

Заключение

В работе проведён анализ компактных моделей транзисторов, используемых в схемотехническом моделировании, и показано, что упрощённые модели Level 1–3 обеспечивают высокую вычислительную эффективность, но уступают по точности моделям семейства BSIM, учитывающим физические эффекты. Определены основные критерии выбора модели, включающие точность, вычислительную сложность и доступность в САПР, на основе которых предложена классификация, связывающая тип транзистора, задачу и используемую модель. Разработана методика выбора модели и САПР, позволяющая формализовать процесс проектирования и обеспечить обоснованный компромисс между точностью и вычислительными затратами, что подтверждает её практическую применимость.

Список литературы

1. Weste N. H. E., Harris D. CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective. – 4th ed. – Boston: Addison-Wesley, 2011.
2. Sheu B. J., Tsividis Y. P. BSIM3v3 MOSFET Model User's Manual. – Berkeley: University of California, 2005.

3. Liu W., Jin X., Xi X., Chen J., Cheng K., Chen M., Chan M., Niknejad A. BSIM4.0 MOSFET Model User's Manual. – Berkeley: University of California, 2000.
4. Patel T. Comparison of Level 1, 2 and 3 MOSFETs. – International Journal of Engineering Research and Applications, 2014.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНОДИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА ДЛЯ БИОСЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

ХАСАНОВА Д.И., МУХАМЕДЖАНОВА В.Р., ГОРОЧНЫЙ А.В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В данной работе рассматривается формирование оксидных слоев титана методом электрохимического анодирования, исследуется влияние параметров анодирования, а также влияние термического отжига и электрохимического самолегирования на свойства оксидных слоев титана.

Ключевые слова: нанотехнологии, электрохимическое анодирование, диоксид титана, электрохимическое самолегирование

Введение

Разработка высокочувствительных, портативных, надежных и экономически эффективных устройств обнаружения маркеров заболеваний приобретает все большее значение в современной аналитической науке. Интеграция различных наноматериалов в конструкцию электрохимических биосенсоров обеспечивает улучшение таких ключевых показателей, как чувствительность, селективность, отношение сигнал-шум и предел обнаружения [1]. Одними из наиболее перспективными из наноматериалов являются наноструктурированные оксиды металлов благодаря их электрическим свойствам, высокому отношению площади поверхности к объему, хорошей адсорбционной способности, высокой реакционной активности, химической стабильности и экологичности. Кроме того, они демонстрируют высокую биологическую активность, выступая в качестве проводящих подложек для иммобилизации биомолекул [2].

Одним из часто используемых оксидов металлов в биосенсорных приложениях является наноструктурированный TiO_2 , поскольку обладает стабильными химическими характеристиками, а включение легирующих примесей потенциально может повышать электропроводность, что приводит к значительным изменениям кристаллической структуры нанопокровов из TiO_2 и чувствительности биосенсоров на их основе [3]. Одним из самых простых способов улучшения электрохимических свойств с недавнего времени считается самолегирование, которое заключается во введении поверхностных кислородных дефектов посредством процессов восстановления с образованием участков Ti^{3+} . Создание восстановленных состояний легирующих примесей должно приводить к почти металлическим свойствам, вводя промежуточные энергетические уровни в запрещенную зону и тем самым улучшая его электропроводность [4].

Материалы и методы

Титановые пленки нанесены на предметные стекла методом магнетронного напыления, толщина металлического слоя варьируется в диапазоне 180–200 нм. Перед процессом анодирования образцы подвергались ультразвуковой очистке в изопропанол и деионизованной воде в течение 15 мин. Анодирование проводилось при напряжении 10

и 20 В в течение 5, 10 и 15 мин в электролите на основе 95% раствора этиленгликоля, содержащего 0,2 масс. % NH_4F . После анодирования образцы промывались в изопропанолe и деионизованной воде, сушились и подвергались кратковременному термическому отжигу в муфельной печи при 450 °C в течение 10 минут.

Для процесса электрохимического самолегирования сформированных слоев TiO_2 использовали раствор 12-водного гидрофосфата натрия $\text{Na}_4\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ при $\text{pH} = 10$. Самолегирование проводилось при помощи трехэлектродной электрохимической ячейки с использованием потенциометра. Анодированный и отожженный электрод погружали в 30 мл раствора электролита и использовали в качестве рабочего электрода, в качестве противоиэлектрода и электрода сравнения использованы платиновый и Ag/AgCl электроды, соответственно. Самолегирование слоев TiO_2 проведено при отрицательном потенциале –1 В, поданном на рабочий электрод, в течение 1 минуты.

Результаты и обсуждение

В ходе эксперимента для каждого образца после каждого этапа поверхностной модификации были получены циклические вольтамперограммы и импедансные спектры. При напряжении 10 В после 5 минут анодирования происходит рост барьерного оксидного слоя и наблюдается уменьшение тока и, соответственно, увеличение импеданса, увеличение времени анодирования до 10 минут ведет к уменьшению импеданса, что, вероятно, связано с возникновением дефектов или образованием пор, вызванных растворением оксида. Дальнейшее увеличение времени анодирования до 15 минут ведет к утолщению оксидного слоя и, как следствие, к увеличению импеданса. Аналогичные результаты получены в результате анодирования при 20 В, однако, наблюдается еще большее уменьшение тока и увеличение импеданса.

Поскольку после анодирования полученные слои TiO_2 являются аморфными, необходимо было подвергнуть образцы термическому отжигу, который позволил получить слои TiO_2 с более кристаллической структурой, что привело к увеличению тока и снижению импеданса, особенно для образцов, полученных при 10 В и 5 мин, а также для образцов, полученных при 20 В. Электрохимическое самолегирование за счет процесса восстановления с образованием кислородных вакансий позволило снизить импеданс для образца, полученного анодированием при напряжении 10 В и времени 10 мин, для остальных образцов эффект от самолегирования оказался незначительным.

Заключение

Данная работа демонстрирует возможность формирования слоев TiO_2 методом электрохимического анодирования и влияние таких параметров анодирования, как время и напряжения, на свойства полученных структур. А также изучено влияние термического отжига и электрохимического самолегирования на импедансный отклик. В результате эксперимента выявлено, что термический отжиг и самолегирование позволяет значительно улучшить характеристики анодированного титана, что делает его перспективной платформой для иммобилизации биораспознающих элементов, наилучшие характеристики продемонстрировал образец, полученный методом анодированием при напряжении 10 В и времени 10 мин.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-79-10055).

Список литературы

1. Rondinini V. et al. Nanomaterials-Enabled Electrochemical Biosensors: From Enhanced Performance to Regulatory Readiness //Applied Sciences. – 2026. – Т. 16. – №. 4. – С. 2048.
2. Keles G. et al. Nanostructured metal oxide-based electrochemical biosensors in medical diagnosis // Biosensors. – 2024. – Т. 14. – №. 5. – С. 238.
3. Liu B., Liu J. Sensors and biosensors based on metal oxide nanomaterials //TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2019. – Т. 121. – С. 115690.
4. Spanu D. et al. Ultrafast electrochemical self-doping of anodic titanium dioxide nanotubes for enhanced electroanalytical and photocatalytic performance //Chemosensors. – 2023. – Т. 11. – №. 11. – С. 560.

РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ИГРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

ХИНГЕЛОВ Г.А., ХАКИМОВ М. Ф., МУРАТОВА Е. Н.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И.

Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе представлена разработка настольной игры, моделирующей процессы научной деятельности в области устойчивой энергетики. Игра позволяет в наглядной форме продемонстрировать влияние финансирования, экологических ограничений и неопределенности результатов экспериментов на итог научной работы. Подобные игровые подходы широко применяются в STEM-образовании и показывают свою эффективность в развитии навыков решения задач и вовлечённости обучающихся [1–3].

Ключевые слова: настольная игра, моделирование, научная деятельность, устойчивое развитие, принятие решений

Введение

Современная научная деятельность характеризуется высокой степенью неопределенности, ограниченностью ресурсов и необходимостью учитывать экологические последствия исследований. В реальной практике исследователь сталкивается с необходимостью выбора между эффективностью, скоростью получения результата и устойчивостью разрабатываемых технологий.

В образовательном процессе данные аспекты, как правило, рассматриваются теоретически, без моделирования реальных условий принятия решений. В то же время игровые методы обучения позволяют повысить вовлечённость студентов и способствуют лучшему усвоению сложных концепций [1, 2].

В связи с этим актуальной задачей является разработка инструментов, позволяющих в интерактивной форме воспроизводить процессы научной деятельности. Одним из таких инструментов являются игровые модели, в частности настольные игры.

Цель работы

Целью работы является разработка настольной игры, моделирующей деятельность научной лаборатории в условиях ограниченных ресурсов, конкуренции и неопределенности результатов экспериментов.

Описание игровой модели

В разработанной игре участник выступает в роли руководителя научной лаборатории. Игровой процесс ограничен фиксированным числом ходов, соответствующих условным «годам» научной работы.

Основной задачей игрока является получение научной премии за счёт эффективного управления ресурсами и выбора стратегии развития.

В игре используются три основных показателя:

- научный вклад
- экологическая устойчивость
- репутация лаборатории

Итоговый результат определяется совокупностью этих параметров, при этом репутация выступает ограничивающим фактором, что отражает реальные механизмы оценки научной деятельности.

Игровой процесс включает три этапа:

- планирование
- проведение исследований
- подведение итогов

На этапе планирования игрок выбирает действия, связанные с развитием лаборатории: проведение исследований, публикация результатов, поиск финансирования и улучшение оборудования.

Результаты исследований имеют вероятностный характер, что отражает неопределенность научных экспериментов, широко отмечаемую в литературе по игровым образовательным моделям [4, 5].

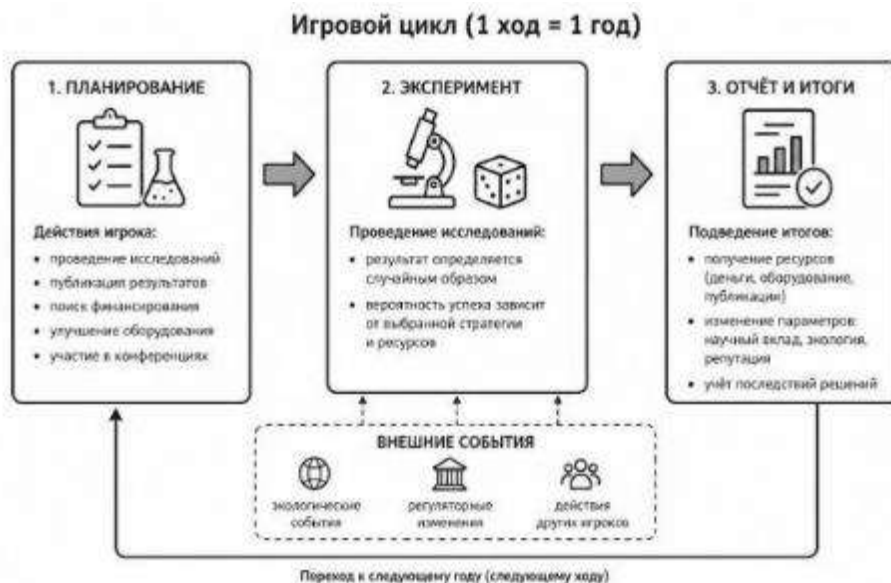


Рисунок 1 — Общая схема игрового процесса

Игровое поле включает зоны, соответствующие различным аспектам научной деятельности: лаборатория, конференции, источники финансирования и контрольные механизмы.



Рисунок 2 — Схема игрового поля

Важным элементом является взаимодействие между игроками. Участники конкурируют за ресурсы, что моделирует реальные условия научной среды.

Особенности и новизна

Разработанная модель отличается от традиционных игровых решений тем, что учитывает особенности научной деятельности.

К основным отличиям относятся:

- учет экологических ограничений при выборе стратегии
- влияние источников финансирования на итоговый результат
- моделирование неопределенности экспериментов
- введение параметра репутации как ограничивающего фактора

В отличие от классических экономических игр, где целью является максимизация ресурсов, в данной модели учитываются дополнительные критерии оценки, характерные для научной среды [3, 6].

Практическая значимость

Разработанная игра может быть использована в образовательных целях, в частности при обучении студентов технических и естественнонаучных направлений.

Игровой подход позволяет:

- повысить вовлечённость обучающихся
- сформировать навыки принятия решений
- развить системное мышление

Исследования показывают, что игровые методы обучения способствуют развитию навыков решения задач и критического мышления [1, 2].

Кроме того, игра может использоваться на научно-популярных мероприятиях для демонстрации принципов устойчивого развития и особенностей научной деятельности.



Рисунок 3 — Пример игровой ситуации (выбор между эффективностью и экологией)

Заключение

В работе представлена игровая модель, позволяющая воспроизводить ключевые элементы научной деятельности в упрощённой форме. Использование подобных подходов может повысить эффективность образовательного процесса и способствовать формированию комплексного понимания научных процессов.

Дальнейшее развитие работы связано с усложнением модели и её апробацией в образовательной среде.

Список литературы

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Альтернативная энергетика: учеб. пособие / под ред. В. А. Мошников, Е. Н. Муратовой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 112 с.
2. Наночастицы, наносистемы и их применение. Перспективные фотоактивные системы для солнечной энергетики / под ред. В. А. Мошников, Е. Н. Муратовой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. 233 с.
3. Muratova E.N. The application of nanotechnologies in the development of alternative energy sources // International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology for a Green and Sustainable future (ICAGS-2023). Maharaja's College, Ernakulam, Kerala, India, 5th to 6th of December 2023, P. 17-18.
4. Муратова Е.Н., Мошников В.А., Врублевский И.А., Алешин А.Н. Способы повышения эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе допированных перовскитных ячеек // 7-ая Школа молодых учёных в рамках Российского форума «Микроэлектроника». 15–23 сентября 2025 года в Университете «Сириус», г. Сочи. С.447-448.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (АСМ) С АНАЛИЗОМ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА

ХРАМОВ М. М.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В данной работе исследуются пьезоэлектрические характеристики наноразмерных структур оксида цинка (ZnO) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с анализом локального электромеханического отклика. Цель работы состоит в изучение влияния морфологии и размеров наноструктур ZnO на их пьезоэлектрические свойства, а также оценка потенциала применения таких

структур в наногенераторах и других устройствах микросистемной техники. В ходе исследования использовались методы пьезорезонансной силовой микроскопии (PFM) для анализа вертикального и латерального пьезоотклика. Результаты работы демонстрируют зависимость пьезоэлектрических свойств от напряжения, приложенного к образцу, и выявляют возможные артефакты измерений. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций для создания эффективных пьезоэлектрических наногенераторов на основе ZnO.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, оксид цинка, наноструктуры, атомно-силовая микроскопия, пьезоэлектрический отклик, наногенераторы

Введение

Пьезоэлектрические материалы, преобразующие механическую энергию в электрическую и наоборот, являются основой современных МЭМС/НЭМС, датчиков и энергосборных устройств. Особый интерес представляет оксид цинка (ZnO), сочетающий химическую стабильность, нетоксичность и выраженные пьезо-/пироэлектрические свойства, что делает его перспективным для гибкой электроники и наногенераторов. Однако эффективность и долговечность устройств на основе ZnO критически зависят не только от морфологии, кристаллографической ориентации и размеров наноструктур, но и от прочности их адгезионного соединения с подложкой. Слабая адгезия может приводить к отслоению активных слоёв под действием механических нагрузок или циклических деформаций, что существенно снижает ресурс и функциональность приборов. В этой связи разработка надёжных методов контроля и оценки адгезионной прочности пьезоэлектрических нанокристаллов и покрытий приобретает особую практическую значимость, что подтверждается современными исследованиями и патентными решениями в данной области [9, 10].

Традиционные макроскопические методы часто не учитывают наноразмерные эффекты, границы зёрен и доменную структуру, тогда как атомно-силовая микроскопия (АСМ) и микроскопия пьезоотклика (PFM) обеспечивают высокоразрешающую нанодиагностику локальных электромеханических характеристик.

Настоящее исследование выполнено на базе Центра сканирующей зондовой микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [7, 8]. Методологическую основу составляют фундаментальные разработки в области АСМ-диагностики [1] и комплексные подходы к нанохарактеризации [2]. Высокоточные измерения обеспечены специализированными зондами с проводящими покрытиями, технологии нанесения которых разработаны авторским коллективом [3]. Накопленный опыт в синтезе сложных оксидных систем, включая мультиферроидные композиты «ядро-оболочка» [4] и гетероструктуры на основе ZnO [5], а также в атомно-молекулярном дизайне [6], позволил детально интерпретировать взаимосвязь между условиями синтеза, микроструктурой и функциональными свойствами.

Подготовка подложек и синтез наноструктур ZnO

В качестве подложек использовались пластины КДБ (100). Очистка включала ультразвуковую обработку в ацетоне (удаление органических загрязнений), промывку в изопропиловом спирте и ополаскивание деионизованной водой. Завершающим этапом стал термический отжиг при 500°C в течение 1 ч для десорбции газов и стабилизации поверхности.

Синтез проводился гидротермальным методом при 85–90°C в течение нескольких часов. Раствор-прекурсор содержал 0,1 М $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, 0,1 М гексаметиленetetрамина (НМТА) и ~1 мас.% поливинилпирролидона (ПВП) в 100 мл деионизованной воды. После

синтеза образцы промывали деионизованной водой. Метод обеспечил формирование плотно упакованных поликристаллических наноструктур с контролируемой морфологией.

Методика исследования

Исследование проводилось на атомно-силовом микроскопе в трёх режимах:

1. Полуконтактный режим (зонды НА_NC, резонансные частоты 140–235 кГц) использовался для топографического картирования без механического повреждения мягких наноструктур.
2. Контактный режим применялся для предварительной оценки рельефа перед PFM-сканированием.
3. Микроскопия пьезоотклика (PFM) основана на обратном пьезоэффекте: подача переменного напряжения на проводящий зонд вызывает локальные деформации поверхности, регистрируемые кантилевером. Метод позволяет визуализировать доменную структуру, ориентацию векторов поляризации и распределение пьезоактивных областей в вертикальной и латеральной компонентах.

Результаты и обсуждение

Топография в полуконтактном режиме (рис. 2 А)) демонстрирует поликристаллическую структуру с размером зёрен 100–200 нм и шероховатостью 10–20 нм. Фазовый контраст (рис. 2 Б)) варьируется от -60° до $+47^\circ$, что указывает на неоднородность механических свойств и различия в кристаллографической ориентации зёрен. Амплитуда колебаний кантилевера (рис. 1) составляет 4741–5295 пА и коррелирует с рельефом: максимумы приходятся на вершины зёрен, минимумы – на межзёренные границы.

PFM-исследование выявило выраженную пространственную неоднородность электромеханического отклика. Амплитуда нормального сигнала составляет 279–683 пА, латерального – 0,09–3,50 нА (рис. 3). Фазовые изображения (рис. 4) показывают плавные переходы нормальной фазы (38 – 148°) и чёткое биполярное распределение латеральной фазы ($-192...+189^\circ$) с антипараллельной ориентацией поляризации, характерное для регулярной доменной структуры.

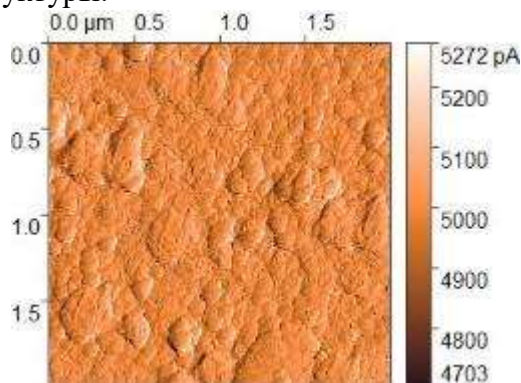


Рис. 1. Амплитуда колебаний зонда при сканировании поверхности ZnO

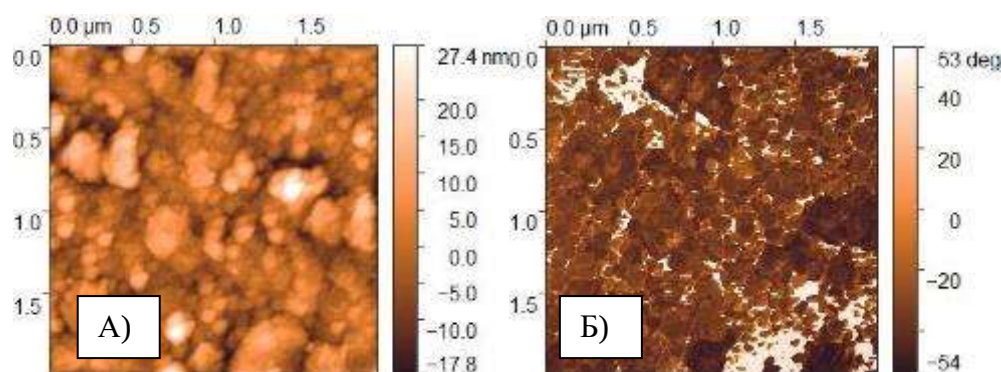


Рис. 2. А) Топография поверхности ZnO; Б) Фазовый контраст поверхности ZnO

Ключевые закономерности:

1. Латеральный пьезоотклик существенно преобладает над нормальным, что свидетельствует о доминировании сдвиговых деформаций.
2. Максимумы латеральной амплитуды локализуются вблизи границ зёрен, указывая на повышенную пьезоактивность межкристаллитных областей.
3. Выявленная доменная структура и корреляция отклика с морфологией подтверждают возможность управления пьезосвойствами через контроль синтеза.
4. Области с аномальным откликом требуют дополнительной верификации методами электронной микроскопии и спектроскопии.

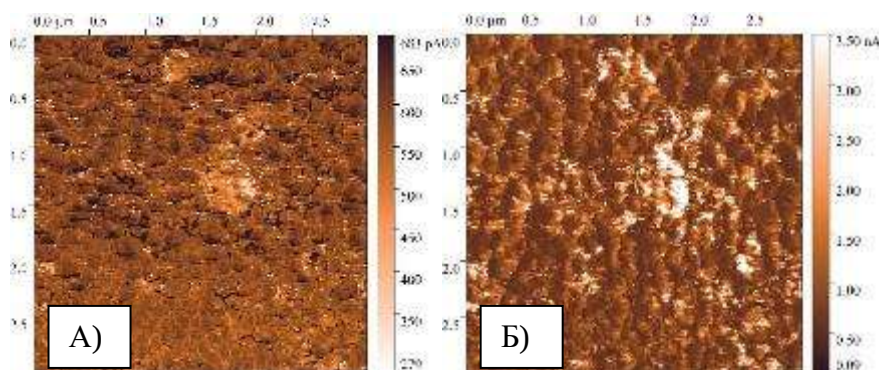


Рис. 3. Амплитуда PFM сигнала. А) нормальный PFM сигнал; Б) латеральный PFM сигнал

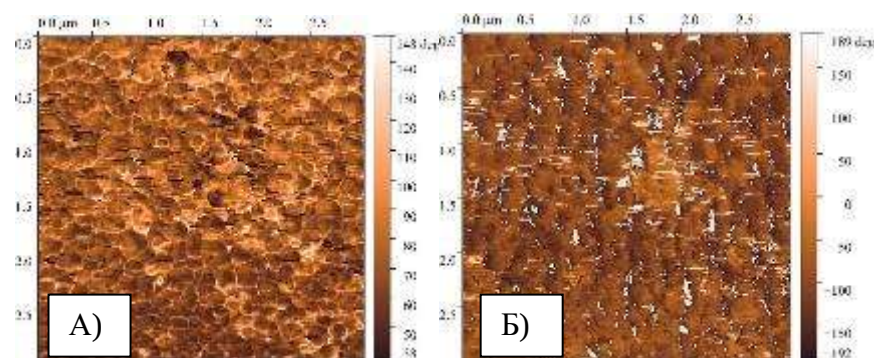


Рис. 4. Амплитуда PFM сигнала. А) нормальный PFM сигнал; Б) латеральный PFM сигнал

Заключение

В работе методом АСМ и PFM исследованы пьезоэлектрические характеристики гидротермально синтезированных наноструктур ZnO. Установлено, что материал обладает поликристаллической морфологией (зёрна 100–300 нм) и выраженной пространственной неоднородностью пьезоотклика, напрямую связанной с кристаллографической ориентацией и границами зёрен. Выявлено преобладание латерального (сдвигового) пьезоэффекта и наличие антипараллельной доменной структуры. Полученные данные подтверждают высокий потенциал наноструктурированного ZnO для создания пьезоэлектрических наногенераторов и адаптивных микросистем, при условии контроля условий синтеза и постобработки. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение влияния легирования, модификации поверхности и формирования гетероструктур для целевого управления пьезосвойствами.

Список литературы

1. Мошников В. А., Спивак Ю. М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологий и диагностики : монография. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. — 80 с.
2. Козодаев Д. А., Налимова С. С., Мошников В. А. Методы нанодиагностики, дополняющие результаты атомно-силовой микроскопии // От нанотехнологий к наноархитектонике : сборник научных трудов. — Уфа : Аэтерна, 2024. — С. 91–167.
3. Козодаев Д. А., Яковлева А. А., Бобков А. А., Рябко А. А., Мошников В. А., Корепанов О. А. Способ нанесения проводящего покрытия на поверхность зонда атомно-силового микроскопа : пат. 2825297 Рос. Федерация : МПК G01Q70/08 / заявитель и патентообладатель ООО «Нова Фотоникс». — № 2023129274 ; заявл. 13.11.2023 ; опубл. 23.08.2024, Бюл. № 24. — 10 с.
4. Shvartsman V. V., Lupascu D. C., Alawneh F., Borisov P., Kozodaev D. Converse magnetoelectric effect in CoFe₂O₄-BaTiO₃ composites with a core-shell structure // Smart Materials and Structures. — 2011. — Vol. 20, № 7. — P. 075006.
5. Карманов А. А., Пронин И. А., Якушова Н. Д., Кондратьев В. М., Большаков А. Д., Мошников В. А. Способ получения фотокатализатора на основе гетероструктуры ZnO/Cu₂O-CuO с повышенной фотокаталитической активностью : пат. 2794093 Рос. Федерация : МПК B01J 23/00 / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». — № 2022109876 ; заявл. 15.04.2022 ; опубл. 11.04.2023, Бюл. № 11. — 12 с.
6. Мошников В. А., Муратова Е. Н. Атомно-молекулярный дизайн и архитектура наноструктур // Наночастицы, наносистемы и их применение. Перспективные фотоактивные системы для солнечной энергетики : сборник научных трудов. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» под редакцией В. А. Мошникова, Е. Н. Муратовой, 2024. — С. 230–232.
7. Козодаев Д. А., Бобков А. А., Мошников В. А., Муратова Е. Н., Соломонов А. В., Трусов М. А. Объединённый центр сканирующей зондовой микроскопии ООО «НОВА СПБ» — СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в области радиоэлектроники — новый тип центра для решения приоритетных задач // Инновации. — 2024. — № 1 (297). — С. 10–18.
8. Бобков А. А., Козодаев Д. А., Мошников В. А. Состояние и перспективы развития сканирующей зондовой микроскопии в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» // Наука настоящего и будущего. — 2024. — Т. 2. — С. 26–29.
9. Лашкова Н. А., Максимов А. И., Мошников В. А. Способ оценки адгезионной прочности соединения пьезоэлектрических нанокристаллов с подложкой // Нано- и микросистемная техника. — 2019. — Т. 21, № 2. — С. 73–82.
10. Лашкова Н. А., Максимов А. И., Алексеев П. А., Мошников В. А. Способ определения адгезионной прочности покрытий к подложке : пат. 2635335 Рос. Федерация : МПК G01N 19/04 / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СПбГЭТУ «ЛЭТИ»». — № 2016122810 ; заявл. 08.06.2016 ; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 32. — 7 с.

МОДИФИКАЦИЯ ГРАФЕНА НА НИКЕЛЕ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРКАЛЯЦИИ АТОМОВ КОБАЛЬТА И КРЕМНИЯ

ЦВЕТКОВ Т.Д.^{1,2}, ГРЕБЕНЮК Г.С.¹, КУЗЬМИН М.В.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина), факультет электроники, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В настоящей работе было проведено исследование изменения графеного слоя, выращенного на подложке никеля, при его интеркаляции последовательно атомами кобальта и кремния. Эксперименты были проведены *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума с помощью фотоэлектронной спектроскопии высокого энергетического разрешения с использованием синхротронного излучения и дифракции медленных электронов. Толщина нанесенных пленок кобальта варьировалась в диапазоне до 3.5 nm, а кремния – до 0.6 nm, температура прогрева составляла 400-450 °C. Установлено, что интеркаляция до 3.5 nm Co приводит к появлению второй компоненты в спектрах основных уровней C 1s, что свидетельствует о возможном рассогласовании решеток металлической подложки и графенового слоя. Последующая интеркаляция атомов кремния приводит к формированию под графеном силицидов кобальта, при этом взаимодействие в области контакта графен-силициды имеет слабый характер.

Ключевые слова: тонкие пленки, графен, кобальт, кремний, интеркаляция, фотоэлектронная спектроскопия

В последние годы интеркаляция, или обратимое внедрение атомов и молекул в межслоевое пространство кристаллической решетки, привлекает значительный интерес как метод получения материалов с уникальными физико-химическими свойствами [1]. Примером таких систем являются структуры графен-массивная подложка (SiC, Ni, Co и др.), в которых с помощью интеркаляционного синтеза можно создавать ультратонкие пленки силицидов переходных металлов, обладающие магнитными свойствами и защищенные от окружающей среды графеновым слоем. Механизмы формирования, фазовый состав, электронные и магнитные свойства таких пленок были подробно исследованы в работах [2-5]. В то же время до сих пор очень мало данных о том, какие изменения происходят в слое графена при интеркаляционном синтезе. Целью настоящей работы было восполнить, хотя бы частично, этот пробел.

Для решения поставленной задачи была исследована тонкая структура фотоэлектронных спектров 1s-уровня углерода высокого разрешения, полученных для однослойного графена на Ni(111) подложке в ходе его интеркаляции атомами кобальта и кремния. Эксперименты проводились *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума на синхротроне HZB BESSY II (г. Берлин). В качестве подложки использовались толстые эпитаксиальные пленки никеля, нанесенные на очищенную поверхность W(110). Для контроля кристаллической структуры этих пленок использовалась дифракция медленных электронов. Графен на поверхности никеля был выращен методом химического осаждения из газовой фазы. В качестве рабочего газа использовался пропилен (C₃H₆). Крекинг пропилена проводился при давлении $2 \cdot 10^{-6}$ mbar и температуре 600°C в течение 10 min. Интеркаляция кобальта и кремния в межслоевой зазор между графеном и никелем производилась путем нанесения на поверхность образца сверхтонких пленок этих материалов и последующего прогрева образца с нанесенными пленками при 400-450°C в течение 10 min. Для контроля количества осажденного вещества использовались кварцевые микровесы. Фотоэлектронные спектры были получены с помощью анализатора PNOIBOS 150 при комнатной температуре. Полное энергетическое разрешение

составляло 100 meV. Остаточное давление во время регистрации было $\leq 2 \cdot 10^{-10}$ mbar. Для анализа спектров проводилось их разложение (декомпозиция) на компоненты методом наименьших квадратов. В качестве модельных функций использовались линейные комбинации лоренцевского и гауссового профилей с весовыми коэффициентами (коэффициентами смешивания η) и возможностью введения параметра асимметрии (псевдо-функция Фойгта). Тестовые разложения проводились также с помощью функций Doniach-Sunjic. Использование данной функции, однако, имеет ряд недостатков [6], и далее в этой работе рассматриваться не будет.

На рис. 1 приведены C 1s-спектры и результаты их разложения для системы графен-Ni(111) до и после интеркаляции кобальта. Энергия возбуждения равна 470 eV. Форма линии для образца, свободного от кобальта, представлена на рисунке слева. Анализ показал, что спектр этой системы состоит из одной компоненты (G). Ее энергия равна 284.85 eV, что примерно на 0.5 eV выше, чем аналогичная величина для графита и свободного графена, и обусловлено сильным взаимодействием *p*-состояния атомов углерода и *d*-состояния атомов никеля. Кроме того, форма пика G близка к чистой лоренцевской форме ($\eta \geq 0.9$) и имеет выраженную асимметрию, что характерно для образцов с металлической электронной структурой.

Напыление пленки кобальта толщиной 0.2 nm (~ один моноатомный слой (ML) атомов Co на Ni(111), или $1.87 \cdot 10^{15}$ at·cm⁻²) при комнатной температуре приводит к уменьшению интенсивности линии C 1s, но ее форма остается неизменной. Интенсивность линии углерода полностью восстанавливается при прогреве образца при 400°C. Такое поведение характерно для интеркаляционных систем и свидетельствует об образовании монослоя атомов Co в промежутке между графеном и никелем. Состояние слоя графена при этом практически не изменяется.

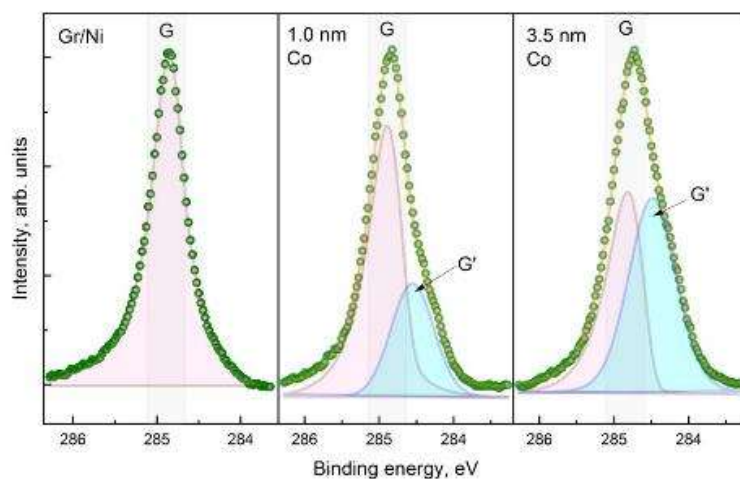


Рис. 1. Эволюция C 1s-спектра системы Gr/Ni(111) при постепенной интеркаляции кобальта до 3.5 nm при энергии возбуждения 470 eV

Дальнейшее увеличение количества атомов кобальта под графеном приводит к заметной трансформации формы 1s-линии углерода. Во-первых, в ней кроме синглета G появляется новая компонента – пик G' с энергией ~284.5 eV. Появление этой компоненты означает, что структура графенового слоя модифицируется, и в нем появляются два неэквивалентных атома углерода. Как показано на рис. 1, увеличение количества кобальта от 1 nm (~5.0 ML) до 3.5 nm (17 ML) сопровождается перераспределением интенсивности

указанных компонент: первая из них постепенно затухает, а вторая – растет, причем соотношение их интенсивностей при увеличении покрытия от 4.9 до 17 ML изменяется почти в четыре раза. Более того, с ростом количества Co происходит изменение профиля синглетов. Пик G монотонно переходит от лоренцевой к гауссовой форме. При покрытии 4.9, 9.7 и 17 ML значение коэффициента η равно соответственно 0.5, 0.25 и 0.1. Что же касается G' , то для него $\eta \leq 0.3$ при всех количествах напыленного металла. Указанные трансформации означают, что по мере увеличения толщины пленки кобальта под графеном изменяется характер взаимодействия атомов углерода и металла. Одна из возможных причин может быть связана с различием постоянных решетки поверхностей Ni(111) и Co(0001) (2.49 и 2.51 Å); рассогласование решеток металлической подложки и графенового слоя (постоянная решетки 2.46 Å) составляет 1.2% в случае Ni и 2.0% в случае Co. Другой возможной причиной может быть полиморфный характер пленок кобальта, что приводит к мультидоменной структуре графена.

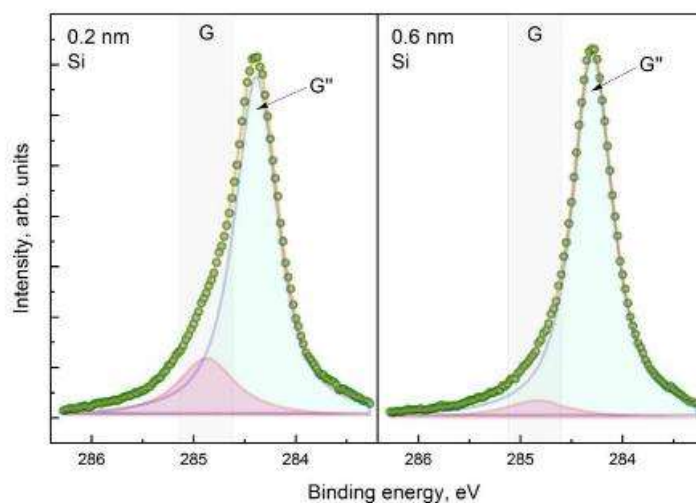


Рис. 2. Эволюция $C\ 1s$ -спектра системы $Gr/Co/Ni(111)$ при постепенной интеркаляции кремния до 0.6 нм

Интеркаляция пленочной структуры графен/Co/Ni атомами Si сопровождается дальнейшей эволюцией формы линии углерода. На рис. 2 показаны $C\ 1s$ -спектры после добавления 0.2 и 0.6 ML кремния (соответственно 0.53 и 1.6 ML). В этих спектрах наблюдаются два пика. Один из них – синглет G , интенсивность которого монотонно затухает с ростом покрытия кремния. Учитывая, что при добавлении кремния в систему происходит образование силицида Co, этот пик может быть приписан атомам углерода, которые не образуют связи с островками этого соединения. Вторая компонента (G') лежит в области энергий (284.3–284.4 eV), которые близки к энергиям, при которых наблюдается пик G' . Тем не менее, характер связи атомов углерода, которые обуславливают эти пики, с нижележащей пленкой разный. Такой вывод следует из того, что пик G'' имеет в отличие от G' выраженную лоренцеву форму ($\eta = 0.86$ –0.90). На основании этого G'' может быть приписан тем частям графитового слоя, которые находятся в контакте с островками силицидов кобальта. Положение этой компоненты на шкале энергий свидетельствует о том, что взаимодействие в области такого контакта имеет слабый характер.

Заключение

Полученные результаты иллюстрируют эволюцию состояния графенового слоя на Ni(111) подложке в ходе интеркалирования атомами кобальта и кремния. Они свидетельствуют, что по мере увеличения количества кобальта в промежутке между никелевой подложкой и графеном изменяется окружение атомов углерода, характер их взаимодействия со слоем металла, а также фазовый состав графенового слоя. При добавлении атомов кремния происходит образование силицида кобальта, что приводит к ослаблению обменного взаимодействия на границе раздела.

Список литературы

1. Dedkov Yu., Voloshina E. Graphene growth and properties on metal substrates. // J. Phys.: Condens. Mater. 2015. V. 27. N. 30. ArtNo: 303002.
2. Grebenyuk G.S., Vilkov O.Yu., Rybkin A.G., Gomoyunova M.V., Senkovskiy B.V., Usachov D.Yu., Vyalikh D.V., Molodtsov S.L., Pronin I.I. Intercalation synthesis of graphene-capped iron silicide atop Ni(111): Evolution of electronic structure and ferromagnetic ordering // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 392. P. 715.
3. Grebenyuk G.S., Dunaevsky S.M., Lobanova E.Yu., Smirnov D.A., Pronin I.I.. Formation of graphene-capped cobalt silicides // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 470. P. 840.
4. Pronin I. I., Dunaevskii S.M., Lobanova E.Yu., Mikhailenko E.K. Modification of the electronic structure of graphene by intercalation of iron and silicon atoms. // Phys. Solid State. 2017. V. 59, N. 10. P. 2063.
5. Grebenyuk G.S., Gomounova M.V., Lobanova E.Yu., Smirnov D.A., Pronin I.I. Graphene modification via cobalt and silicon intercalation // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. N. 9. ArtNo: 092006.
6. G.H. Major, N.Farley, P. M.A.Sherwood, M.R.Linford, J.Terry, V.Fernandez, K.Artyushkova. Practical guide for curve fitting in x-ray photoelectron spectroscopy // J. Vac. Sci. Technol. A. 2020. V. 38. N. 6. ArtNo: 061203.

СРАВНЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР GESN/GE/SI

ЧУМАНОВ И.В.¹, ХАХУЛИН С.А.¹, ФИРСОВ Д.Д.¹, КОМКОВ О.С.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе проведены исследования по сравнению методов фототражения (ФО) и фотопропускания (ФП), реализованных на базе ИК фурье-спектроскопии. Оба метода позволили получить набор сигналов, характеризующих параметры и зонную структуру гетероструктур $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}/\text{Ge}/\text{Si}$. Метод ФП оказался полезным для исследования верхнего слоя на основе твёрдого раствора, так как в отличие от ФО, позволил получить более выраженный сигнал. Метод ФО, наоборот, сильнее выделил различные сигналы от слоя Ge, что делает возможным характеристику всей гетероструктуры в целом. Применение совокупности модуляционных методов позволит проводить более детальные исследования, что важно при разработке приборов фотоэлектроники.

Ключевые слова: фотоотражение, фотопропускание, отражение, пропускание, фурье-спектроскопия, германий, олово, кремний, GeSn, инфракрасная спектроскопия, полупроводники, оптоэлектроника

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-19-00742

Введение

Полупроводниковый твёрдый раствор $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ в настоящее время продолжает активно исследоваться научными группами во всём мире [1–5]. На основе данного материала возможно создание различных фотоэлектронных приборов в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн [6]. Важно, что изменение состава твёрдого раствора обеспечивает не только возможность управления шириной запрещённой зоны,

но также позволяет получать прямую структуру зон. Это открывает возможности применения данного полупроводника для создания как фоточувствительных структур [7], так и светоизлучающих приборов [8].

При разработке приборов оптоэлектроники важное место занимают процессы подготовки и отладки технологии. В реализации данных задач особое место занимают процессы контроля синтезированных материалов и структур. Особую роль среди методов исследования их оптических свойств играют методы модуляционной спектроскопии, которые являются точными и высокочувствительными. Благодаря их применению в исследовании стало возможно получить обширную информацию о зонной структуре полупроводников.

В настоящей работе продемонстрированы результаты сравнения фотомодуляционных методов отражения и пропускания. Применение данных методов для исследований гетероструктур $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}/\text{Ge}/\text{Si}$ позволило охарактеризовать зонную структуру слоёв, а также определить наиболее подходящий метод для проведения дальнейших исследований твёрдого раствора $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ и гетероструктур на его основе. В литературе представлено ограниченное число работ, посвящённых фотопропусканию, что подчёркивает актуальность настоящего исследования и его научную новизну в контексте изучения новых материалов.

Описание эксперимента

Для исследований были выбраны образцы с эпитаксиальным слоем $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}/\text{Ge}/\text{Si}$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН (г. Новосибирск). В качестве основы использовалась подложка Si(100) с кремниевым буферным слоем, поверх которого формировалась нелегированная "виртуальная подложка" из германия. Заключительный слой твёрдого раствора $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$ выращивался при пониженных температурах, а его толщина составила 200 нм. Для исследования образца был задействован измерительный комплекс на базе ИК фурье-спектрометра Vertex 80. В качестве источника зондового излучения применялась лампа накаливания, а для детектирования сигнала – фотодиод на основе антимонида индия с азотным охлаждением. Данный комплекс позволяет проводить измерения спектров оптического отражения (R) и пропускания (T), а также имеет возможность регистрировать модуляционные спектры фотоотражения (ФО) и фотопропускания (ФП). Применение последних методов становится возможным за счёт фотомодуляции встроенного электрического поля в образце лазерным излучением, которое имеет длину волны 405 нм и механически прерывается на частоте ~2.3 кГц. Для детектирования сигнала применяется синхронный усилитель SR-830.

Обсуждение результатов

Спектр $A=1-R-T$, полученный из спектров отражения и пропускания исследуемой структуры, имеет несколько слабовыраженных особенностей, которые могут соответствовать оптическим переходам в слоях $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$ и германия, а также присутствует более выраженная "ступенька" от кремниевой подложки. Существенным недостатком данного метода является невозможность точного определения энергии оптических переходов в исследуемых образцах.

Более информативными оказались методы модуляционной спектроскопии. Спектры фотоотражения и фотопропускания позволили наблюдать характерные особенности, соответствующие оптическим переходам в слоях структуры $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}/\text{Ge}/\text{Si}$, что

позволило получить точные значения их энергий. Фотомодуляционные методы зарегистрировали сигнал от верхнего эпитаксиального слоя на основе твёрдого раствора, что в измеренном спектре проявляется в виде дифференциально-подобных кривых в области прямого межзонного перехода в $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$. Оба метода позволили наблюдать сдвиг энергии прямых переходов в германиевой "виртуальной подложке" в высокоэнергетическую область, что предполагает наличие нескомпенсированных механических напряжений сжатия в этом слое. Отдельно нужно отметить в спектрах сигнал от переходов с участием спин-отщепленной подзоны в Ge. Также метод ФО позволил наблюдать более выраженный периодический сигнал в области энергий, расположенных выше ширины запрещённой зоны в точке Г, который представляет собой осцилляции Франца-Келдыша. Его анализ позволяет выделить дополнительную информацию об исследуемом образце, которая включает напряжённость электрического поля, а также оцененное значение концентрации легирующей примеси.

Сравнение спектров ФО и ФП показало, что последний метод позволил получить более интенсивный сигнал в области энергий переходов в эпитаксиальном слое $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$. Это выделяет ФП как метод с высокой чувствительностью и большими перспективами для применения в исследованиях. С другой стороны, спектры ФП имеют заметно более слабые сигналы от германиевого слоя. Такое ослабление связано с активным поглощением проходящего зондового излучения в слое "виртуальной подложки". В совокупности это демонстрирует отличную применимость метода ФП для исследования оптических свойств эпитаксиальных слоёв $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$.

Заключение

В заключении стоит отметить, что классические методы на основе оптического пропускания и отражения являются более простыми, могут быть достаточно информативными, но не всегда позволяют подробно исследовать зонную структуру материала или гетероструктуры. Более мощными и информативными являются методы фотомодуляционной спектроскопии (фотоотражения и фотопропускания), но вместе с этим они также являются более сложными для реализации и интерпретации полученных результатов. В работе показано их главное преимущество – точность в определении энергии наблюдаемых переходов и высокая информативность, что позволяет детектировать переходы с участием более высоких подзон и определять связанные с легированием параметры. Сравнение двух модуляционных методов показало, метод ФО имеет богатый набор сигналов, связанных с высокоэнергетичными переходами, в то время как метод ФП лучшим образом подходит для исследования верхнего эпитаксиального слоя $\text{Ge}_{0.95}\text{Sn}_{0.05}$, так как его спектры имеют более выраженный соответствующий сигнал в сравнении с сигналами от других слоёв.

Благодарности

Коллектив авторов благодарит Тимофеева В. А., Машанова В. И. и Скворцова И. В. из Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН за предоставление образцов для исследований.

Список литературы

1. Zaima S., Nakatsuka O., Taoka N., Kurosawa M., Takeuchi W., Sakashita M. Growth and applications of GeSn-related group-IV semiconductor materials. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16 (4) (2015) 043502.
2. Chen W. C., Lee P. H., Torkaman P., Yang S. H. Germanium–Tin (GeSn) terahertz photoconductive detector. *ACS Photonics* (2025), 13 (6) 1609–1616.

3. Timofeev V. A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Skvortsov I. V., Gayduk A. E., Bloshkin A. A., Loshkarev I. D., Kirienko V. V., Kolyada D. V., Firsov D. D., Komkov O. S. Tuning the structural and optical properties of GeSiSn/Si multiple quantum wells and GeSn nanostructures using annealing and a faceted surface as a substrate. *Applied Surface Science*, 593 (2022) 153421.
4. Wirths S., Geiger R., von den Driesch N., Mussler G., Stoica T., Mantl S., Ikonik Z., Luysberg M., Chiussi S., Hartmann J. M., Sigg H., Faist J., Buca D., Grützmacher D. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si. *Nature Photonics*, 9 (2015) 88–92.
5. Zelazna K., Welna M., Misiewicz J., Dekoster J., Kudrawiec R. Temperature dependence of energy gap of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ alloys with $x < 0.11$ studied by photoreflectance. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49 (23) (2016) 235301.
6. Timofeev V. A., Mashanov V. I., Nikiforov A. I., Loshkarev I. D., Gulyaev D. V., Volodin V. A., Kozhukhov A. S., Komkov O. S., Firsov D. D., Korolkov I. V. Study of structural and optical properties of a dual-band material based on tin oxides and GeSiSn compounds. *Applied Surface Science*, 573 (2022) 151615.
7. Tran H., Pham T., Margetis J., Zhou Y., Dou W., Grant P. C., Grant J. M., Al-Kabi S., Sun G., Soref R. A., Tolle J., Zhang Y.-H., Du W., Li B., Mortazavi M., Yu S.-Q. Si-based GeSn photodetectors toward mid-infrared imaging applications. *ACS Photonics*, 6 (11) (2019) 2807–2815.
8. Atalla M. R., Assali S., Daligou G., Attiaoui A., Koelling S., Daoust P., Moutanabbir O. Continuous-wave GeSn light-emitting diodes on silicon with 2.5 μm room-temperature emission. *ACS Photonics*, 11 (3) (2024) 1335–1341.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВАХ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ СО СБОРОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.С. ШИГАРОВА^{1,2}, Н.В. ЧЕНЦОВА^{1,2}, С.А. СОКОВ^{1,3},
А.Г. КОЛОСЬКО¹, С.В. ФИЛИПPOB¹, Е.О. ПОПОВ¹

¹ *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

³ *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

Аннотация. Работа посвящена развитию методологии обработки экспериментальных вольт-амперных характеристик полупроводниковых полевых катодов на основе оксида цинка. Подход основан на переходе от анализа единичных характеристик к статистической обработке массива экспериментальных данных, получаемого при сканировании в режиме непрерывной волны. Разработан и реализован в программной среде LabVIEW алгоритм автоматического извлечения значений эффективных параметров и проведения их статистического анализа. Проведён сравнительный анализ трёх теоретических моделей эмиссии: классического приближения Елинсона-Шредника в уравнении Мерфи-Гуда для металлов, НР-приближения повышенной точности (также для металлов) и полупроводниковой модели Стрэттона. Показано, что статистический анализ позволяет не только более корректно оценить эффективные параметры, но также оценить их стабильность и выявить модель, наиболее адекватно описывающую физику процесса.

Ключевые слова: полевая эмиссия, оксид цинка, вольт-амперная характеристика, статистическая обработка, коэффициент усиления поля, площадь эмиссии.

1. Введение

Полевая эмиссия – это процесс туннелирования электронов из металла или полупроводника под действием сильного электрического поля, описываемый теорией Фаулера-Нордгейма (FN). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) является ключевой характеристикой полевого катода, которая позволяет определять эффективные параметры, такие как коэффициент усиления поля γ и площадь эмиссии A . Однако вычисление это осложнено рядом факторов: нестабильностью эмиссионного тока, зависимостью от выбранных координат для обработки ВАХ, а также от выбора участка ВАХ, который выбирается для анализа [1].

Данные эффективные параметры извлекаются из обработки экспериментальных ВАХ с помощью линеаризации их в FN-координатах ($\ln(I/U^2)$ vs $1/U$, где I – эмиссионный ток, U – напряжения). Эти координаты позволяют построить линию тренда и сопоставить эксперимент с теорией.

В случае применения уравнения Мерфи-Гуда в приближении Елинсона-Шредника, разработанном для металлов, строится линейная регрессия. Это позволяет извлекать коэффициент усиления поля γ из наклона линии тренда, а эффективную площадь A – из отсечки (пересечение с осью ординат экстраполяции прямой линии тренда)

Стоит отдельно отметить встроенный в программу-обработчик тест Форбса [2], который позволяет проверять регистрируемые ВАХ на соответствие режиму холодной полевой эмиссии. Для этого используется наклон линии тренда и граничные значения напряжения на анализируемом участке ВАХ.

В случае применения в анализе уравнения Мерфи-Гуда в приближении высокой точности (НР) или уравнения Стрэттона, разработанного для полупроводников и учитывающего проникновение поля внутрь материала катода, получение эффективных параметров с помощью линейной регрессии в FN-координатах затруднено, так как эти законы не линеаризуются аналитически.

Получение эффективных параметров в этом случае возможно с применением метода общей линии тренда (т.н. KPF-plot) [3]. Этот метод обеспечивает равенство коэффициентов линейных регрессий экспериментальной и модельной ВАХ в FN-координатах путём итеративной корректировки параметров до достижения совпадения экспериментальной кривой с теоретической.

2. Объект исследования, методика эксперимента и алгоритм обработки ВАХ

В качестве объекта исследования были выбраны самоорганизующиеся массивы игольчатых наноструктур оксида цинка (ZnO), выращенные методом термического окисления на кремниевой подложке. ZnO – это прямозонный полупроводник n-типа с широкой запрещённой зоной (E_g равной около 3.37 эВ у больших кристаллов, а у нанокристаллов уменьшается до 3.10 эВ). При этом поверхностные дефекты кристаллической решётки выступают в роли доноров с энергией активации около 0.01 эВ, а большая площадь поверхности нанокристаллов обеспечивает им повышенную концентрацию свободных электронов. Высокое аспектное отношение игл ZnO (средняя длина около 4 мкм, плотность распределения около 5 мкм⁻²) обеспечивает значительное локальное усиление внешнего электрического поля на их вершинах [4].

С целью получения развитой эмиссионной поверхности на подложке из кремния площадью 0.8 см² был выращен стохастический массив с общим количеством острий около $4 \cdot 10^8$. Такая архитектура, сочетающая в себе большое количество эмиссионных центров с высоким аспектным отношением, позволяет получать стабильные и относительно высокие эмиссионные токи при умеренных средних напряжённостях поля.

Экспериментальное исследование эмиссионных свойств образцов ZnO проводилось на высоковольтной вакуумной измерительной установке с системой многоканальной синхронизированной регистрации электрических сигналов. Методика обеспечивает одновременную запись уровня приложенного напряжения, силы эмиссионного тока и давления остаточной атмосферы. Для визуализации распределения эмиссионных центров по поверхности применялся люминофорный анод в сочетании с цифровым микроскопом в конфигурации плоского автоэмиссионного полевого проектора.

Сканирование высоким напряжением осуществлялось в режиме непрерывной волны: на катод подавались полусинусоидальные импульсы длительностью 10 мс, в ответ на которые синхронно регистрировались импульсы эмиссионного тока (с частотой оцифровки 500 точек на импульс). Каждый единичный импульс напряжения порождал развёрнутую во времени ВАХ, содержащую 500 пар значений «напряжение-ток».

Специально разработанная в среде LabVIEW программа реализует следующий алгоритм обработки. На первом этапе для каждой точки каждого импульса производится перевод данных в координаты Фаулера-Нордгейма. Затем в автоматическом режиме для каждой реализации ВАХ методом наименьших квадратов или же с применением KPF-plot строится линия тренда и определяются эффективные параметры катода. В результате обработки серии из 1400 последовательно зарегистрированных ВАХ формируются два массива эффективных параметров γ и A размерностью 1400 значений в каждом. Точная оценка свойств катода получается путём усреднения этих статистических выборок.

3. Теоретические модели полевой эмиссии

Сравнительный анализ экспериментальных данных проводился в рамках трёх теоретических подходов, к каждому из которых была применена описанная выше статистическая обработка. Первый подход – модель Мерфи-Гуда в приближении Елинсона-Шредника, классическая для металлических эмиттеров [5]. Уравнение для плотности тока имеет вид:

$$J = A \left(\frac{a_{FN}}{1.1} \right) \varphi^{-1} \exp(1.03\eta) F_R^2 f^2 \exp\left(-\frac{0.95\eta}{f}\right), \quad (1)$$

где f – безразмерное поле, A – площадь эмиссионной поверхности с одинаковым полем f в каждой точке, $\eta(\varphi) = b_{FN} c_S^2 \varphi^{-\frac{1}{2}}$, a_{FN} и b_{FN} – первая и вторая константы Фаулера-Нордгейма, а $F_R = \varphi^2 c_S^{-2}$ – поле снятия барьера, c_S^{-2} – константа Шоттки.

Второй подход – НР-приближение повышенной точности, которое даёт более строгое описание зависимости тока от поля благодаря разложению специальных эллиптических функций τ и ν в степенные ряды до 6-го порядка [6]. Третий подход – полупроводниковая модель Стрэттона, которая отличается от первых двух тем, что включает в рассмотрение глубину проникновения поля в эмиттер – изгиб зон полупроводника [7].

Формула эмиссии Стрэттона $\theta_s > 0$:

$$J = A_1 \frac{F^2}{\varphi} \exp \left[-\frac{B_1}{F} \vartheta(Y) \frac{1}{q} \right] \left(1 - \exp\left(-\frac{C}{q}\right) \left(1 + \frac{C}{q} \right) \right), \quad (2)$$

где $A_1 = q^3/(8\pi h)$, q – элементарный заряд, h – постоянная планка; $B_1 = 4\varphi_s^{3/2} k/3$, $k = 2\pi\sqrt{2m}/h$, m – масса электрона; $C = 2k \cdot \theta_s \cdot \varphi_s^{1/2}/F$, F – электрическое поле;

$$\vartheta(Y) = 1 - Y + Y \ln(Y)/6, \quad (3)$$

$$Y = \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{F}}{\varphi_s} \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\varepsilon_0}}, \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме.

4. Результаты численного моделирования и их анализ

Последовательная обработка массивов из 1400 ВАХ тремя методами (тремя теоретическими уравнениями) позволила получить статистически обоснованные оценки средних эффективных параметров для каждой модели. Результаты показаны в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Эффективные параметры полевой эмиссии, полученные путем усреднения по выборке

Теоретическая модель	Коэффициент усиления поля γ	Среднее квадратичное отклонение γ	Эффективная площадь A , нм^2	Среднее квадратичное отклонение A , нм^2
Елинсон-Шредник	251,26	3,14	$0,98 \cdot 10^6$	188074
НР-приближение	247,57	3,09	$1,23 \cdot 10^6$	235919
Модель Стрэттона	255,03	3,18	$2,68 \cdot 10^6$	514924

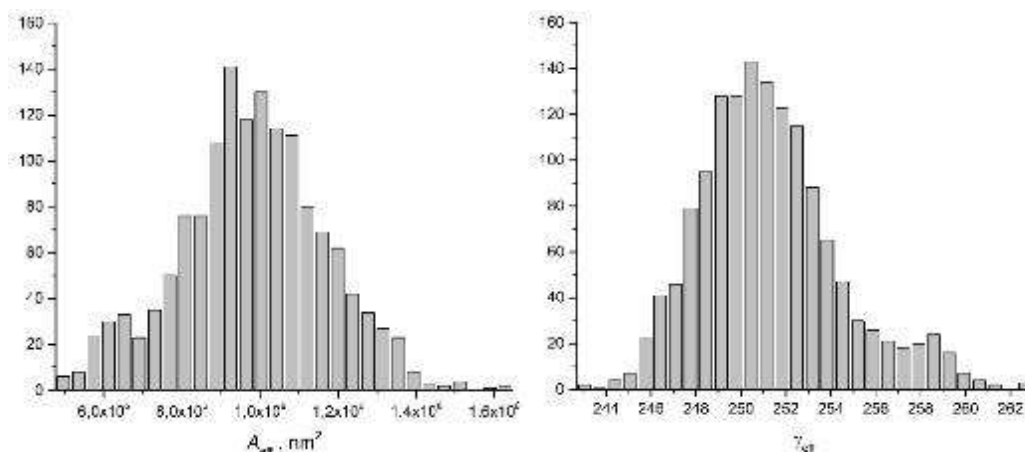


Рис.1 Гистограммы разброса эффективных параметров для приближения Елинсона-Шредника

5. Заключение

Разработанная методика автоматизированного сбора и статистической обработки массивов ВАХ в среде LabVIEW позволила перейти от анализа единичных реализаций к получению статистически оценок эффективных эмиссионных параметров. Подход минимизирует влияние случайных флуктуаций и даёт возможность оценить воспроизводимость и устойчивость параметров катода во времени.

Сравнительный анализ трёх теоретических моделей на основе единой статистической выборки показал, что коэффициент усиления поля фактически инвариантен к выбору модели (меняется несущественно), тогда как площадь эмиссии существенно зависит от выбора теоретической модели.

Список литературы

- 1 Колосько А. Г., Филиппов С. В., Попов Е. О. Сравнение методов обработки вольт-амперных характеристик многоострийного полевого катода //Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – №. 12. – С. 2162-2166
2. Popov E. O., Kolosko A. G., Filippov S. V. Electrical field admissible values for the classical field emitter regime in the study of large area emitters //AIP Advances. – 2019. – Т. 9. – №. 1
- 3 Колосько А. Г., Попов Е. О., Филиппов С. В. Метод получения эффективных параметров полевых катодов с применением многопараметрических уравнений полевой эмиссии высокой точности //Вестник Санкт-

Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2025. – Т. 21. – №. 1. – С. 47-57

4. Wu C., Wei, H., Liu, Q., Zhang, Z., Zhang, G., Bie, Y., Chen, J. Fabrication of gated zinc oxide nanowire field emitter arrays for a compact flat-panel x-ray source // Third International Academic Conference on Optics and Photonics (IACOP 2025). SPIE, 2026. Vol. 14013. P. 156-161

5. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Ненакаливаемые катоды. М.: Сов. радио, 1974. 336 с

6. Forbes R. G., Popov E. O., Kolosko A. G., Filippov S. V. The pre-exponential voltage-exponent as a sensitive test parameter for field emission theories // R. Soc. Open Sci. 2021. Vol. 8. No. 3. P. 201986-1–201986-19

7. Stratton R. Field emission from semiconductors // Proceedings of the Physical Society. Section B. 1955. Vol. 68. No. 10. P. 746-757

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ И РЕКОМБИНАЦИЮ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПЕРОВСКИТ-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

Шипков В.И.¹, Гец Д.С.¹

¹Университет ИТМО

Аннотация. В работе исследовано влияние добавок щелочных металлов (Cs, Rb, K, Na) на люминесценцию и рекомбинацию носителей заряда в перовскит-полимерных композитах CsPbBr₃–ПЭО. Установлено, что наилучшим образом пассивация происходит за счет натрия. Его добавление увеличивает квантовый выход фотолюминесценции с 17.5% до 28.8%, повышает время безызлучательной рекомбинации с 330 нс до 820 нс и снижает порог усиленной спонтанной люминесценции с 14.6 до 11.1 мкДж/см².

Ключевые слова: перовскит-полимерный композит, фотолюминесценция, усиленная спонтанная люминесценция, рекомбинация носителей заряда, пассивирование щелочными металлами.

В настоящий момент устройства на основе галогенидных перовскитов демонстрируют высокие эффективности. Так, например, эффективность преобразования энергии солнечного элемента на основе йодного перовскита со смешанным катионным составом может достигать 27% при изготовлении растворными методами [1]. Однако, такие эффективности могут достигаться только в йодных перовскитах, что обусловлено более быстрым и менее хаотичным ростом кристаллов при проливе антирастворителем в сравнении с бромными и хлорными. Эти галогениды применяются в светоизлучающих устройствах, поскольку обладают такими выдающимися оптоэлектронными характеристиками, как высокий коэффициент поглощения, сбалансированные мобильности носителей заряда, возможность достижения усиленной спонтанной люминесценции, а также лёгкая адаптируемость состава[2].

К тому же метод синтеза с использованием антирастворителя обладает рядом недостатков, таких как высокая токсичность, низкая воспроизводимость эффективности устройств и плохая масштабируемость. Одним из возможных путей решения возникших трудностей является использование перовскит-полимерного композита [3,4]. В этом случае полимер выступает в качестве контролирующей рост кристаллитов добавки, матрицы, а также, в случае полиэтиленоксида (ПЭО) и поливинилпирролидона (ПВП), пассиватором поверхности перовскита. Данный метод позволяет получать пленки бромидного перовскита высокого качества без использования антирастворителя. Если для светодиодов получаемые яркости, а для фотодиодов — чувствительность оказываются достаточными, то для достижения лазерной генерации при оптической накачке необходимы большие времена жизни носителей заряда.

В этой работе мы использовали щелочные металлы (Cs, Rb, K, Na) в качестве добавки к перовскит-полимерному композиту CsPbBr₃–ПЭО. Эти добавки пассивируют поверхность, стабилизируя поверхностные галогенидные ионы, что увеличивает как квантовый выход, так и время безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Кроме того, при встраивании в решётку они могут влиять на времена излучательной рекомбинации [5,6].

Квантовый выход фотолюминесценции измерялся в диапазоне плотностей мощности накачки от 0.3 мВт/см² до 1.5 Вт/см² с использованием интегрирующей сферы. Такой метод позволяет качественно сравнивать динамические характеристики тонких пленок разного состава. При добавлении щелочных металлов максимальный квантовый выход фотолюминесценции возрос с 17.5% до 24.3%, 25.7%, 26.9% и 28.8% для Cs, Rb, K и Na соответственно.

Время-разрешенная фотолюминесценция измерялась методом подсчета одиночных фотонов, коррелированных по времени при накачке около 1 нДж/см² с помощью фс-лазера. Как результат пассивации время безызлучательной рекомбинации через дефекты увеличилось с 330 нс до 410 нс, 550 нс, 680 нс и 820 нс, а время излучательной электрон-дырочной рекомбинации уменьшилось с 18.6 нс до 9.8 нс, 11.6 нс, 15.9 нс и 13.8 нс для Cs, Rb, K и Na. Данные образцы также демонстрируют усиленную спонтанную люминесценцию, причём порог закономерно снижается с 14.6 до 11.1 мкДж/см² при увеличении времени безызлучательной рекомбинации и квантового выхода фотолюминесценции.

Добавки щелочных металлов эффективно пассивируют дефекты в CsPbBr₃–ПЭО, увеличивая квантовый выход фотолюминесценции до 28.8% и время безызлучательной рекомбинации до 820 нс. Наилучшие результаты достигнуты для Na, что может быть связано с его оптимальным ионным радиусом для поверхностной пассивации бромных вакансий. Порог усиленной спонтанной люминесценции снижен на 24%.

Список литературы

1. Li G, Zhang Z, Agyei-Tuffour B, Wu L, Gries T, Prashanthan K, Musiienko A, Li J, Zhu R, Hart L, Wang L, Li Z, Hou B, Saba M, Barnes P, Nelson J, Dyson P, Nazeeruddin M, Li M, Abate A. Stabilizing high-efficiency perovskite solar cells via strategic interfacial contact engineering // *Nat. Photonics. Nature Research*, 2026. Т. 20, № 1. С. 55–62.
2. Shi Y, Deng X, Gan Y, Xu L, Zhang Q, Xiong Q. Ten Years of Perovskite Lasers // *Advanced Materials. John Wiley and Sons Inc*, 2025. Т. 37, № 25.
3. Perveen A, Hussain S, Xu Y, Raza A, Saeed F, Din N, Subramanian A, Khan Q, Lei W. Solution processed and highly efficient UV-photodetector based on CsPbBr₃ perovskite-polymer composite film // *J. Photochem. Photobiol. A Chem. Elsevier B.V.*, 2022. Т. 426.
4. Lee S., Cho J. S., Kang D. W. Perovskite/polyethylene oxide composites: Toward perovskite solar cells without anti-solvent treatment // *Ceram. Int. Elsevier Ltd*, 2019. Т. 45, № 17. С. 23399–23405.
5. Tabassum M, Zia Q, Ye H, Neal W, Aslam S, Zhang J, Su L. Fabrication of Potassium- and Rubidium-Doped Formamidinium Lead Bromide Nanocrystals for Surface Defect Passivation and Improved Photoluminescence Stability // *ACS Appl. Electron. Mater. American Chemical Society*, 2024. Т. 6, № 1. С. 550–558.
6. Abdi-Jalebi M, Andaji-Garmaroudi Z, Cacovich S, Stavrakas C, Philippe B, Richter J, Alsari M, Booker E, Hutter E, Pearson A, Lilliu S, Savenije T, Rensmo H, Divitini G, Ducati C, Friend R, Stranks S. Maximizing and stabilizing luminescence from halide perovskites with potassium passivation // *Nature. Nature Publishing Group*, 2018. Т. 555, № 7697. С. 497–501.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

ШМЕЛЕВА Е.А.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию влияния топологической оптимизации на механические свойства изделий из полиамида PA12, полученных методом селективного лазерного спекания (SLS). В рамках исследования были проведены сравнительные механические испытания на растяжение образцов с оптимизированной и исходной структурой для оценки эффективности примененных методов облегчения конструкции. Актуальность работы обусловлена возрастающей потребностью в производстве лёгких и одновременно прочных деталей для авиакосмической, автомобильной и робототехнической отраслей, где каждый грамм массы критически влияет на энергоэффективность и ресурс изделия.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, SIMP, селективное лазерное спекание, полиамид, PA12, растяжение.

Топологическая оптимизация представляет собой математический метод проектирования, направленный на поиск наилучшего распределения материала внутри заданного рабочего пространства при соблюдении установленных граничных условий (нагрузок, опор и технологических ограничений). Топологический подход позволяет алгоритму создавать принципиально новую геометрию, включая появление новых отверстий и сложных внутренних полостей. Конечной целью процесса является получение конструкции с минимально возможной массой при сохранении требуемой жесткости и прочности.

В данной работе будет использован метод топологической оптимизации SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Ключевая задача метода заключается в минимизации показателя податливости детали путем рационального размещения материала внутри выделенного объема, что позволяет генерировать геометрию с уникальными параметрами детали. Применение этого метода дает возможность проектировать структуры с предельно высокими прочностными характеристиками для самого широкого спектра технических задач. Итогом вычислений становится формирование равнопрочной конструкции, в которой каждый элемент объема задействован максимально эффективно с точки зрения восприятия внешних нагрузок.

Варьируемым параметром исследования является целевое значение остаточной массы: в ходе работы были синтезированы и проанализированы структуры с сохранением 90%, 80% и 70% от первоначальной массы материала, а в качестве эталона для сравнения использовалась исходная неоптимизированная модель (100% массы). На рис. 1 приведены изначально построенная модель пластины и оптимизированные образцы из стандартного полиамида (PA12), размером 10x100 мм и толщиной 1 мм.

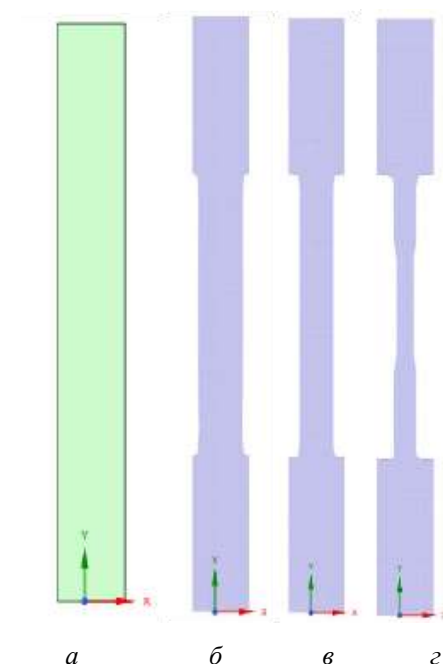


Рис. 1. Сравнение детали до и после оптимизации (а – изначальная деталь; б - 90% от исх. массы; в - 80% от исх. массы, г - 70% от исх. массы)

Original Mass	1,0099e-003 kg
Final Mass	9,1216e-004 kg

а

Original Mass	1,0099e-003 kg
Final Mass	8,1722e-004 kg

б

Original Mass	1,0099e-003 kg
Final Mass	7,0081e-004 kg

в

Рис. 2. Сравнение значений масс до и после оптимизации в программном пакете ANSYS (а - 90% от исх. массы; б - 80% от исх. массы; в - 70% от исх. массы)

На рисунке 3-4 представлен результат статического расчета оптимизированных деталей. Полученные значения максимальных напряжений значительно превышает предел прочности стандартного полиамида PA12, значения которого составляет 45-50 МПа. В последствие при приложенной нагрузке к деталям возникают напряжения, ведущие к их разрушению при испытании растяжением напечатанных образцов.

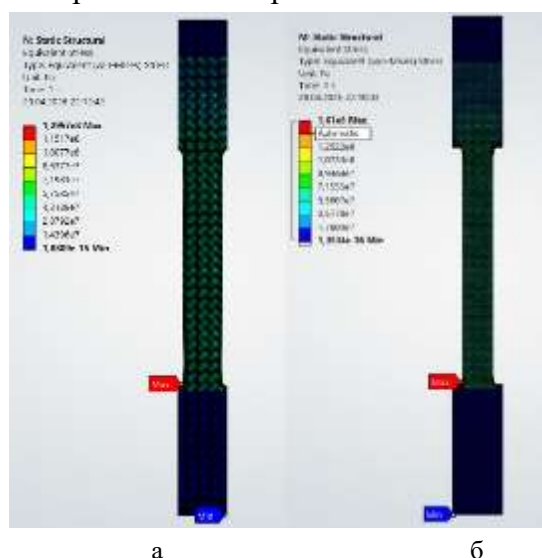


Рис. 3. Статический расчет оптимизированных деталей (а – 90% от исх. массы; б - 80% от исх. массы)

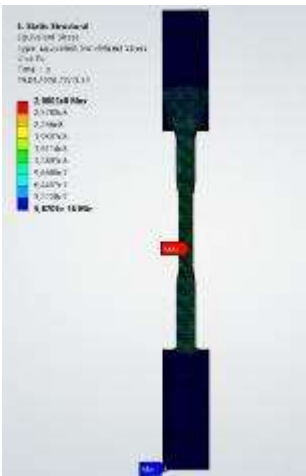


Рис. 4. Статический расчет оптимизированной детали с 70% от исх. массы

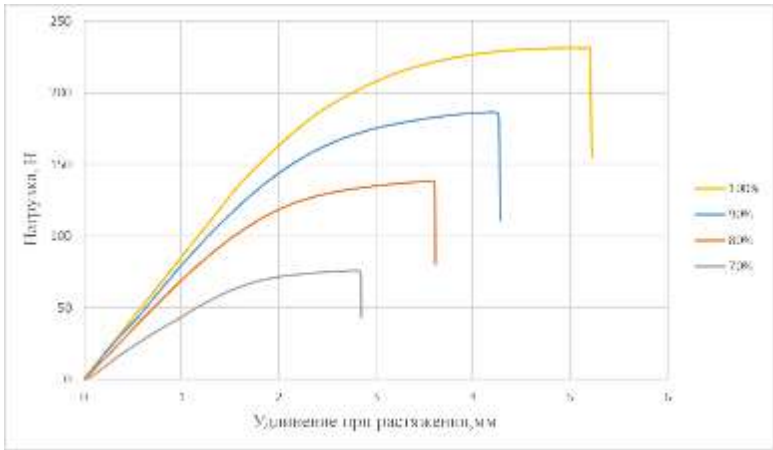


Рис. 5. Зависимость нагрузки от удлинения при растяжении для 4 образцов при диагональной ориентации печати (45°)

Получены зависимости нагрузки от удлинения при растяжении при проведении механических испытаний на растяжение при диагональной ориентации печати образцов (рис.5). Для оценки эффективности применения топологической оптимизации вводится коэффициент удельной текучести, с помощью которого определяется какую нагрузку выдерживает 1 килограмм материала детали до того, как начнётся пластическая деформация:

$$K = \frac{F_{нач}}{m}, \tag{1}$$

где $F_{нач}$ — сила начала деформации, m — масса образца.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента удельной текучести напечатанных образцов

Масса образца после печати, гр.	Процент от исходной массы, %	Сила начала деформации, Н	Коэффициент удельной текучести
1,013	100	136,3	134,55
0,918	90	128,7	140,2
0,82	80	120,02	146,37
0,709	70	63,21	89,15

По результатам расчетов наблюдается устойчивый рост коэффициента удельной текучести при снижении массы образца до 80%. Для образца с массой 80% значение коэффициента удельной текучести составило $K = 146,37$, что на 8,8% выше, чем у эталонного образца. Это свидетельствует о том, что топологическая оптимизация на данном этапе эффективно удаляет материал, слабо нагруженный в исходной конструкции, при этом повышая прочностные характеристики на единицу массы. Наибольшее значение коэффициента удельной текучести достигается именно для образца, сохранившего 80% исходной массы, что позволяет рассматривать данный уровень оптимизации как оптимальный для рассматриваемой геометрии и условий нагружения. Однако при дальнейшем снижении массы до 70% от исходной происходит резкое ухудшение как силы начала деформации, так и коэффициента удельной текучести (с 134,55 до 89,15). Это указывает на существование критического порога удаления материала: при превышении 20% удаления массы топологическая оптимизация начинает затрагивать основные силовые элементы конструкции, что ведёт к потере структурной целостности и непропорционально быстрому падению несущей способности.

Список литературы

1. M. P. Bendsøe, O. Sigmund. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications // New York: Springer, 2003. – 370 p.
2. Кротких, П. В. Максимов. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 1. – С. 91–94.
3. O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J. Z. Zhu. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 752 p.
4. J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, R. C. Advincula. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 20. – P. 44–67.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ АНОДНОГО ТРАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ

ЯКОВЛЕВА У.А.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия

Аннотация. В работе исследовано влияние плотности тока и времени анодного травления на формирование морфологии пористого слоя и толщины пористого слоя кремния р-типа проводимости. Проведен анализ СЭМ-изображений и установлены закономерности роста пористой структуры. Анодное травление проводилось в HF-содержащем электролите в гальваностатическом режиме при плотностях тока 10 20 мА/см² и 20 мА/см² и временах травления 30 минут, 60 минут и 100 минут. Толщина пористого слоя определялась по данным поперечных СЭМ-изображений, на основании которых рассчитывалась средняя скорость травления. Проведен сравнительный анализ зависимости толщины слоя от времени травления при различных плотностях тока, а также исследованы изменения морфологии пористой структуры.

Ключевые слова: пористый кремний, анодное травление, плотность тока, морфология пор, СЭМ, электрохимическое травление.

Введение

Пористый кремний представляет собой материал, который формируется на поверхности пластин монокристаллического Si в результате их химической или электрохимической обработки в растворах плавиковой кислоты. Особый интерес к нему связан с тем, что изменение условий электрохимической обработки позволяет направленно влиять на структуру формируемого слоя: его толщину, степень развитости

поверхности, размеры пор и однородность распределения порового пространства [1-3]. В большинстве случаев анодное травление применяется как способ формирования пористой структуры Si.

Целью работы является анализ анодного травления кремния р-типа в режиме постоянной плотности тока и разработка процессов формирования морфологии пористой структуры Si. Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть физические основы электрохимического порообразования, описать используемую экспериментальную установку и условия травления, а также проанализировать полученные результаты с точки зрения зависимости толщины слоя и особенностей морфологии от времени обработки и плотности тока.

Для экспериментальной части данной работы наибольшую актуальность представляет установление зависимости между технологическими режимами травления и характеристиками получаемого пористого слоя. На практике ключевыми параметрами процесса являются время травления, плотность тока, состав электролита и условия проведения эксперимента. Именно их изменение определяет скорость растворения кремния, толщину образующегося слоя, а также особенности морфологии поверхности [2,4].

Механизм анодного травления кремния

Процесс анодного травления кремния реализуется в результате протекания электрохимических реакций на границе раздела кремний–электролит. При этом возможно существование двух конкурирующих режимов: локализованного растворения с образованием пористой структуры и равномерного растворения поверхности (электрополировки) [5-7]. Выбор режима определяется плотностью тока, составом электролита и условиями эксперимента.

Ключевую роль в формировании пор играет распределение электрического поля на поверхности кремния. Усиление поля на локальных неоднородностях приводит к ускоренному растворению в этих областях и инициирует рост пор. В дальнейшем рост пор стабилизируется за счёт локализации тока на их дне [7,8].

Основными технологическими параметрами процесса анодного травления являются плотность тока, время травления, температура и состав электролита. Изменение этих параметров влияет на скорость растворения кремния, глубину порообразования и морфологию формируемой структуры [2,4].

Экспериментальная часть

В качестве исходного материала использовали пластины монокристаллического кремния р-типа проводимости КДБ-10 с ориентацией поверхности (100). Анодное травление проводили в электролите состава 6:9:25 = HF:ISO:H₂O при температуре 21,7–24 °С. Для оценки влияния технологических параметров в эксперименте были выбраны два уровня плотности тока: 10 мА/см² и 20 мА/см², а продолжительность травления составляла 30 минут, 60 минут и 100 минут. Электрический контакт с тыльной стороной образца обеспечивался при помощи In-Ga эвтектики, катодом служила платиновая сетка.

Толщина сформированного пористого слоя определялась по поперечным СЭМ-изображениям. По измеренной толщине рассчитывалась средняя скорость травления пор по глубине: $V_{тр} = h / t$, где h — толщина пористого слоя, t — время травления.

Такой подход позволяет сопоставить морфологические признаки с кинетикой анодного травления и оценить, как изменение времени и плотности тока влияет на глубину

порообразования. Сводные количественные характеристики образцов представлены в таблице.

Таблица 1

Количественные характеристики образцов по результатам травления

Образец	T, °C	t, min	j, мА/см ²	h, μm	V _{тр} , μm/min
1	21,7	30	10	9,850	0,328
2	21,7	60	10	21,900	0,365
3	24,0	100	10	49,800	0,498
4	24	30	20	7,91	0,264
5	24	60	20	19,8	0,33
6	24	100	20	82,8	0,828

Анализ СЭМ-изображений показал, что при плотности тока 10 мА/см² формируется сравнительно однородная столбчатая структура пор, ориентированных перпендикулярно поверхности кремния. На начальных этапах травления формируется тонкий пористый слой, при увеличении времени происходит его равномерное утолщение без существенного изменения морфологии.

При увеличении плотности тока до 20 мА/см² наблюдается более интенсивное развитие пористой структуры. Уже при малых временах травления формируется более выраженный пористый рельеф. С увеличением времени травления толщина слоя возрастает значительно быстрее, чем при меньшей плотности тока.

Рисунок 1 отражает зависимость толщины пористого слоя от времени травления при двух значениях плотности тока. Для режима $j = 10$ мА/см² толщина слоя возрастает от 9,85 до 49,8 мкм при увеличении времени от 30 до 100 мин, что приводит к росту глубины травления. Для режима $j = 20$ мА/см² толщина изменяется от 7,91 до 82,8 мкм, на больших временах рост становится более интенсивным.

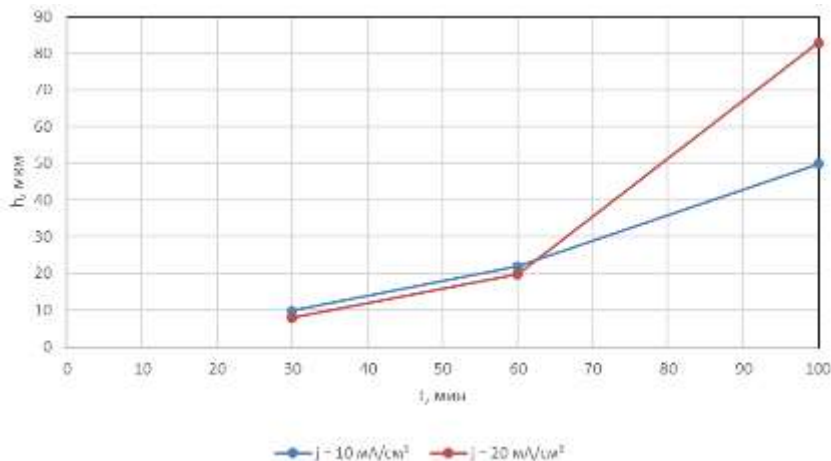


Рисунок 1 – Зависимость толщины пористого слоя от времени травления

Особенно заметное различие проявляется при времени травления 100 минут. В этом случае толщина слоя при плотности тока 20 мА/см² достигает 82,8 мкм, что существенно превышает значение для режима 10 мА/см². Это свидетельствует об ускорении процесса порообразования при увеличении плотности тока.

Сравнительный анализ показал, что при малых временах травления влияние плотности тока выражено слабо. Однако при увеличении времени травления вклад плотности тока становится определяющим фактором.

Установлено, что скорость роста пор по глубине при плотности тока 20 мА/см² превышает аналогичное значение для 10 мА/см² примерно в 1,66 раза. Это объясняется усилением локализации электрического поля на дне пор и увеличением плотности тока в активной зоне растворения.

В ходе работы установлено, что увеличение времени травления приводит к росту толщины пористого слоя при обоих режимах. При этом характер роста зависит от плотности тока: при меньших значениях наблюдается более равномерное наращивание слоя, при больших — ускоренное развитие пористой структуры. Наибольший эффект проявляется при длительном травлении, когда при $j = 20$ мА/см² достигается максимальная толщина пористого слоя и формируется столбчатая структура пор за счет формирования наибольшей глубины. Следовательно, увеличение плотности тока сопровождается усилением локализации тока на дне пор и ростом скорости.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что параметры анодного травления оказывают определяющее влияние на формирование пористого слоя кремния. Управление плотностью тока и временем травления позволяет целенаправленно изменять морфологию и толщину пористого слоя.

Таким образом, в работе отработаны режимы анодного травления, обеспечивающие управляемое формирование пористых структур кремния с заданными характеристиками. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов получения функциональных пористых слоев для применения в нано- и микроэлектронике.

Список литературы

1. Гостева Е.А. Градиентно-пористые структуры кремния с графеноподобными слоями. – 2018.
2. Иржак Д.В.; Рощупкин Д.В.; Старков В.В.; Фахртдинов Р.Р. Исследование структур из кремния с периодически изменяющейся пористостью методами рентгеновской дифрактометрии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 11. С. 82–86.
3. Gosteva E.A.; Rubtsova K.I.; Silina M.D.; Starkov V.V. Formation of Gradient-Porous Silicon Structures with Variable Pore Morphology // Mechanics of Solids. 2020. Vol. 55, No. 1. P. 103–107.
4. Starkov V.V.; Gosteva E.A.; Zherebtsov D.D.; Chichkov M.V.; Alexandrov N.V. Nanoporous Layers and the Peculiarities of Their Local Formation on a Silicon Wafer // Processes. 2022. 10(1):163.
5. Милешко Л.П.; Авдеев С.П.; Нестюрина Е.Е. Слоистое строение анодных плёнок SiO₂, легированных фосфором или бором // Известия вузов. Электроника. 2009. № 1(75). С. 12–16.
6. Старков В.В.; Цейтлин В.М.; Конли И.; Престинг Х.; Кёниг У.; Вяткин А.Ф. Неупорядоченное формирование макропор в кремнии р-типа // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 35–39.
7. Емельянов В.И.; Старков В.В. Нелинейная динамика самоорганизации гексагональных ансамблей пор при окислении и травлении металлов и полупроводников // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 11. С. 53–68.
8. Emel'yanov V.I.; Eremin K.I.; Starkov V.V.; Gavrilin E.Yu. Quasi-One-Dimensional Distribution of Macropores in Anodically Etched Uniaxially Stressed Silicon Plates // Technical Physics Letters. 2003. Vol. 29. No. 3. P. 226–229.

Сборник материалов
XIV Всероссийской Научно-практической конференции
с международным участием
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»
для студентов, аспирантов и молодых ученых
состоявшейся 16-18 мая 2026 г. в г.Санкт-Петербурге
Том VI