

ННБ XIII, Санкт-Петербург, 15-16(17) мая 2025

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

**XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕН-
ЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»

ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



Сборник материалов конференции
16 – 18 мая 2026

Том V

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 5. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026. 151 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
ГИБРИДНЫЙ МИКРОФЛЮИДНЫЙ ЧИП С СИСТЕМОЙ ОПТОВОЛОКОН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАДИУСА МАКРОМОЛЕКУЛ МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ ЗИММА	
АЛЕКСЕЕВ Я.С.....	5
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИБИТНОЙ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ	
АНАНЬЕВ А.Д., АНДРЕЕВА Н.В., МАЗИНГ Д.С., РЫНДИН Е.А.	7
ФОТОДЕТЕКЦИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ.....	
БЕЛОУСОВ А.И.....	10
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ КИСЛОРОДНЫХ ВАКАНСИЙ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТИТАНАТЕ БАРИЯ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ	
БЕЛЯЕВ Г.1, АНДРЕЕВА Н.В.1, ПЕТУХОВ А.Е.2	13
СПОСОБ УТОНЕНИЯ МЕМБРАН КРЕМНИЕВЫХ ФПЗС	
БЕЛЯЕВ Г.С.1, СОКОЛОВА А.А.2	16
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ НАНОАЛМАЗОВ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ.....	
БОБКОВ А.А. ¹ , МИТРОФАНОВ М.И. ² , КОЗОДАЕВ Д.А. ³	20
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ	
БОГДАНОВА Э.Д. ¹ , НЕУСТРОЕВ И.Д. ²	23
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	
БРЫЗГАЛОВ В.Л., КОСТИН Р.О., ШИШКИНА М.Н.....	27
ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
С.С. Бузовкин, А.А. Рыбина, П.Ф. Самсыгин, Р.С. Крюков	31
G-C ₃ N ₄ И КОМПОЗИТЫ НА ЕГО ОСНОВЕ В ГАЗОВОЙ СЕНСОРИКЕ: ОТ 2D НАНОЛИСТОВ К 0D/1D И 2D/2D ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ	
Буй К. Д., НАЛИМОВА С. С.	34
РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ.....	
ВАЛЬШИНА Р., СИТКОВ Н.О.	37
РАЗРАБОТКА СТЕНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ блока управления заслонками модуля обеспечения температурно-влажностного режима	
ВАСИЛЬЕВ Н.С.	40

ТОНКИЕ ПЛЁНКИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА САМАРИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.....	
Видлацкий А.	44
ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА ПЛАНАРНЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ	
Власов П.А.....	47
Исследования морфологии и свойств транспортных слоёв для перовскитных солнечных элементов	
Гаджей А.О., Козлов С.В.....	51
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ.....	
Говенько И.В., Корнев К.А., Платонов Р.А.....	55
КАРБОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПОДЛОЖЕК ИЗ КОНСТРУКЦИОННОГО ГРАФИТА	
Григоренко М.С., Быков Ю.О.....	59
ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ РФЭ-СПЕКТРОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ	
Гришечкина С.О.1, Андреева Н.В1, Вилков О.Ю.2.....	63
РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ СТЕНДА ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ.....	
Гудков Е.И.	67
РЕГИСТРАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОДЛОЖКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ.....	
Горляк А.Н., Дмитриева А.Н., Марков А.В., Трушлякова В.В.....	69
ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ И РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	
Добрынин И.А. ¹ , Гостева Е.А. ²	73
ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ZrO_2 - HfO_2 - Y_2O_3 - Eu_2O_3 - Nd_2O_3	
Егорова У.С. ^{1,2}	75
СОЗДАНИЕ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЁНОК $CsPbI_2Br$, ЛЕГИРОВАННЫХ ХЛОРИДОМ ЦЕЗИЯ, В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ.....	
Жаравин М.А., Тарасов А.С., Исаев Ю.Е., Дегтерев А.Э.....	78
СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	
Иванова С.А., Пщелко Н.С.	84
ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОДЛОЖКАМ ЗА СЧЕТ СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	

ИВАНОВА С.А. ¹ , КОЗОДАЕВ Д.А. ² , ПЩЕЛКО Н.С. ³ ,	88
ДАТЧИК ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ОБЪЁМОВ ВЕЩЕСТВА..	
Е.В. ИЛЬИН, К.Г. ЕЛАНСКАЯ, Д.С. АГАФОНОВА	91
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОЛИНЗ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ ОПЛАВЛЕНИИ ТОРЦОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН	
КАЛИНИН В.И., АГАФОНОВА Д.С.	94
ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛАНДАУ–ГИНЗБУРГА–ДЕВОНШИРА ИЗ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ.....	
КАРЫМСАКОВ К. Е., ЗУБКО С. П., ДМИТРИЕВ К. А.	97
АВТОНОМНАЯ МЕТЕОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMega328 С БЕСПРОВОДНЫМ ДАТЧИКОМ.....	
КОВАЛЕВ А. С.	101
УПРАВЛЕНИЕ РОСТОМ КРИСТАЛЛОВ MgB_2V_3 МЕТОДОМ ЗАТРАВОЧНОЙ ОБРАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ СУХОГО ВОЗДУХА.....	
КОВАЛЕВ М.О., ДЕГТЕРЕВ А.Э., ТАРАСОВ А.С., ИСАЕВ Ю.Е.	106
РАЗРАБОТКА УВЧ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ НА ПЛАНАРНЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.....	
КОЙГЕРОВ А.С., ВЛАСОВ П.А.	109
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОФЛЮИДНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СИЛЫ ЛОРЕНЦА, ИНТЕГРИРУЕМОГО В ЛАБОРАТОРИЮ-НА-ЧИПЕ ДЛЯ СПЕКЛ- АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ К АНТИБИОТИКАМ	
КОМАРОВ А.А., СИБГАТОВ Р.Р.	112
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СВОЙСТВ AlGaAs/GaAs ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С КОНТАКТНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА AuGe	
КОМПАНИЕЦ В.М., РОМАНЧУК А.К., СОЛДАТЕНКОВ Ф.Ю., МАЛЕВСКАЯ А.В.	116
ОСОБЕННОСТИ 4F-ФОТОЭМИССИИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР $\text{O}_2\text{-Yb-Si(111)}$	
КОТЕНКО Р.П. ¹ , КУЗЬМИН М.В. ²	119
АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДИЗАЙН СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА	
КОТЛЯРОВА В. С., КРАСНИКОВА М. М., МАКАРОВА О. Г., НАЛИМОВА С. С.	123
МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА В ВИДЕ СЛУЧАЙНОГО ТЕЛЕГРАФНОГО СИГНАЛА В СУБМИКРОННЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА	
КРАСНОКУТСКИЙ Д. С.	125
HDL-КОНТРОЛЛЕР УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ MEMS-СЕНСОРОВ	

КУВАРЗИН В., ПОЛЯКОВ Д. А.	129
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ МАКРОДЕФЕКТОВ В ПОДЛОЖКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	
ГОРЛЯК А.Н. ¹ , КУЗЬМИН Е.А., ТРУШЛЯКОВА В.В., УСИКОВА М.А.	133
РАЗРАБОТКА НОСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО МОНИТОРИНГА САТУРАЦИИ КРОВИ И ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ ...	
КУШНАРЕВА О.А., ШАПОВАЛОВ С.В.	137
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОТНЫХ И ОСНОВНЫХ ЦЕНТРОВ ЛЬЮИСА И БРЁНСТЕДА МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	
МАГАЗИНОВ А.А., ГАГАРИНА А.Ю., СПИВАК Ю.М.	143
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВАЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ИТТЕРБИИ ПРИ АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ СО	
МАГАНОВ А.А. ^{1,2} , КУЗЬМИН М.В. ²	145
ВЫСОКОСИММЕТРИЧНЫЕ АНАЛОГИ МОЗАИКИ ПЕНРОУЗА	
МАДИСОН П.А., МАДИСОН А.Е.	149

ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

ГИБРИДНЫЙ МИКРОФЛЮИДНЫЙ ЧИП С СИСТЕМОЙ ОПТОВОЛОКОН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАДИУСА МАКРОМОЛЕКУЛ МЕТО- ДОМ СТАТИЧЕСКОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ ЗИММА

АЛЕКСЕЕВ Я.С.

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

Аннотация. Создание гибридного микрофлюидного чипа для измерения параметров макромолекул методом статического светорассеяния Зимма при разных концентрациях для упрощения проведения экспериментов без необходимости расчетов нужного состава раствора и растворителя. В чип встроена система оптоволокон, которая позволяет проводить эксперимент под всеми необходимыми углами сразу.

Метод статического светорассеяния Зимма (или диаграмма Зимма) [1] представляет собой графический анализ данных интенсивности светового потока рассеянного излучения в зависимости от угла рассеяния и концентрации, что позволяет определять среднесреднюю молекулярную массу (M_w) и радиус инерции (R_g^2) макромолекул. Для анализа данных используют двойную экстраполяцию данных светорассеяния к нулевой концентрации и нулевому углу рассеяния. Такая экстраполяция позволяет анализировать размер и взаимодействия в растворе макромолекул, а также позволяет исключить влияние концентрации и угла рассеяния при любой форме макромолекул.

Способ графической обработки данных, соответствует Релеевскому рассеянию, то есть рассеянию без изменения длины волны света на микронеоднородностях размер которых значительно меньше длины волны падающего излучения. Отношение [1] называется диаграммой Зимма:

$$\frac{K_{\omega}}{R_{ex}} = \frac{1}{M} \left(1 + \frac{R_g^2}{3} q^2 \right) (1 + 2B_2 \omega) [1]$$

Получаемые серии зависимостей могут быть экстраполированы для определения молекулярного веса (массы). Также возможно получать угловые зависимости.

Таким образом метод Зимма является информативным подходом для характеристик наноразмерных объектов, таких как макромолекулы синтетических и природных полимеров, белки, наночастицы, квантовые точки. При этом оборудование для проведения измерений является крайне громоздким, дорогостоящим и малодоступным.

В данной работе проводится исследование технологии и конструкции гибридной системы на чипе для измерения диаграмм Зимма.

Чип сконструирован для проведения эксперимента при нескольких значениях концентрации исходного вещества. Для ускорения проведения эксперимента, вместо подбора раствора с наиболее подходящим значением концентрации, было сделано несколько входов для подачи растворителя, каждый из которых обеспечивает получение раствора с концентрацией в 2 раза меньше предыдущего (Рис.1). В итоге на выходе будут растворы (100% / 50% / 25% / 12.5%). Контроль раствора исследуемой концентрации осуществляется открытием входов каналов с растворителем и увеличением давления на них для поддержания постоянства и равенства объёмных скоростей растворителя и раствора макромолекул, что обеспечивает равное соотношение объемов смешиваемых образцов. Лазерное и регистрируемые под разными углами излучения будут попадать на образец по встроенному в специальные каналы стеклянному оптоволокну диаметром 100 мкм, которые собраны в пучок и вплотную прижаты к матрице камеры для одновременной детекции рассеянного света по всем направлениям. Полная блок-схема представлена на Рис.2.



Рис. 1 первый прототип чипа

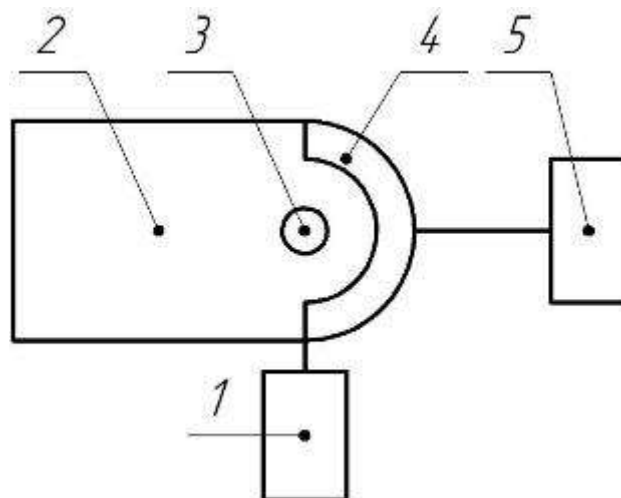


Рис. 2 Блок схема чипа: 1 – лазер, 2 – чип, 3 – образец, 4 – оптоволокно, 5 – матрица камеры

Список литературы

1. B.H. Zimm. "Molecular Theory of the Scattering of Light in Fluids". J. Chem. Phys. 1945. 13 (4): 141.
2. Zimm BH. The scattering of light and the radial distribution function of high polymer solutions. The Journal of chemical physics. 1948 Dec 1;16(12):1093-9.
3. Zhao H, Brown PH, Schuck P. On the distribution of protein refractive index increments. Biophys J. 2011 May 4;100(9):2309-17.
4. Nakamura Y., Terao K., Hirano T., Takano A. Molecular Size and Shape. Characterization of Polymers in Solution. Springer. 2025. – 32-36 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК МУЛЬТИБИТНОЙ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

АНАНЬЕВ А.Д., АНДРЕЕВА Н.В., МАЗИНГ Д.С., РЫНДИН Е.А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Успех технологии мультимбитной резистивной памяти (ReRAM) в значительной степени зависит от возможности управления точечными дефектами структуры – кислородными вакансиями в тонких металлооксидных пленках. Динамика кислородных вакансий во многом определяет такую характеристику энергонезависимой памяти, как время хранения данных. В работе представлен новый подход к моделированию особенностей хранения данных в ячейках резистивной памяти на основе тонких пленок нестехиометрического диоксида титана. В основе подхода лежит моделирование эволюции филамента с использованием термодинамических методов, описывающих процесс деградации филамента с позиций теории спиноподального распада. Результаты численного моделирования верифицированы экспериментальными исследованиями динамики многоуровневых состояний в ячейках резистивной памяти.

Ключевые слова: резистивная память, ReRAM, термодинамическое моделирование, спиноподальный распад, уравнение Кана-Хилларда, диоксид титана, удержание данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

На сегодняшний день резистивная память (ReRAM) на основе тонких металлооксидных пленок рассматривается в качестве наиболее перспективного кандидата на роль электронной компонентной базы (ЭКБ) для реализации аналоговых вычислений в памяти. К преимуществам мультимбитной энергонезависимой памяти относятся простота интеграции

в BEOL-процесс КМОП-технологии, высокая скорость работы и низкое энергопотребление [1]. Однако проблемой практического применения мемристивных структур является деградация резистивных состояний ячейки памяти во времени.

Классические подходы к моделированию деградации состояний ReRAM опираются на закон диффузии Фика. Они предполагают, что кислородные вакансии, образующие при резистивном переключении филамент, диффундируют из области высокой концентрации в область низкой концентрации в слоях функционального диэлектрика [2]. Данная модель предсказывает растворение филамента за несколько часов, что противоречит экспериментально наблюдаемому долговременному (до 10 лет) сохранению резистивных состояний на практике [3].

Цель работы — определение условий стабилизации характеристик мультибитной энергонезависимой резистивной памяти посредством моделирования временной стабильности резистивных состояний в рамках термодинамического подхода, учитывающего возможность фазового разделения (спинодального распада) рабочего слоя оксида.

В рамках развиваемого подхода движущей силой массопереноса является не градиент концентрации, а градиент химического потенциала. Система стремится не к гомогенному распределению элементов, а к состоянию «потокowego равновесия», при котором материал остается разделенным на область, близкую к стехиометрическому составу функционального оксида, и обедненную кислородом фазу проводящего филамента.

Для достижения поставленной цели в работе был реализован комплексный подход, включающий аналитические термодинамические расчеты, численное моделирование и экспериментальную верификацию.

На первом этапе была разработана термодинамическая модель спинодального распада для нестехиометрического рабочего слоя TiO_{2-x} . Был проведен пошаговый расчет свободной энергии Гиббса смешения. Для вычисления конфигурационной энтропии адаптирована двухподрешеточная модель: энтропия кислородной подрешетки рассчитывалась аналитически, а для титановой подрешетки решалась комбинаторная задача с последующей логарифмической экстраполяцией на макроскопический объем. Энтальпия смешения определялась на основе данных теории функционала плотности с применением модели регулярного раствора. Анализ зависимости свободной энергии от стехиометрического состава рабочего оксида методом общей касательной доказывает стремление системы к сегрегации на обедненную кислородом фазу и фазу, состав которой близок к стехиометрии.

На втором этапе эволюция проводящего филамента моделировалась на основе обобщенного уравнения транспорта, где движущей силой массопереноса является градиент локального химического потенциала. Процесс фазового расслоения описывался дифференциальным уравнением Кана-Хилларда четвертого порядка в частных производных [4]. Для численного решения уравнения Кана-Хилларда была проведена его дискретизация методом конечных разностей на неравномерной пространственно-временной сетке. Исходное уравнение четвертого порядка было представлено в виде системы из двух уравнений второго порядка. Была применена полуневяная схема, обеспечивающая линеаризацию модели на каждом временном слое, что позволило исключить ресурсоемкий итерационный процесс, значительно сократив время вычислений.

Для численного моделирования пространственно-временной эволюции филамента в режиме хранения данных (без внешнего электрического поля) были разработаны программные средства физико-топологического моделирования. Моделирование проводилось на двумерной координатной сетке с граничными условиями Неймана (изолированная ячейка). Начальные условия задавали геометрию неразрывного филамента шириной W для низкоомного состояния (LRS) и филамента с разрывом G для высокоомного (HRS).

В результате серии численных расчетов профиля концентрации вакансий вдоль центральной оси филамента для временного интервала 24 часа при 300 °С (рисунок 1) при заданных значениях W определялся зазор G между границей филамента и верхним электродом структуры, обеспечивающий стабильность резистивного состояния. На основе этих расчетов была построена диаграмма стабильности мемристивной структуры данного типа (рисунок 2) с выделением трех вариантов состояния ячейки: зоны деградации LRS в результате растворения филамента, зоны деградации HRS при зарастании филамента и зоны сохранения состояния (стабильности филамента). Выявлено, что ключевым параметром, определяющим состояние мемристора, является коэффициент Кана-Хилларда.

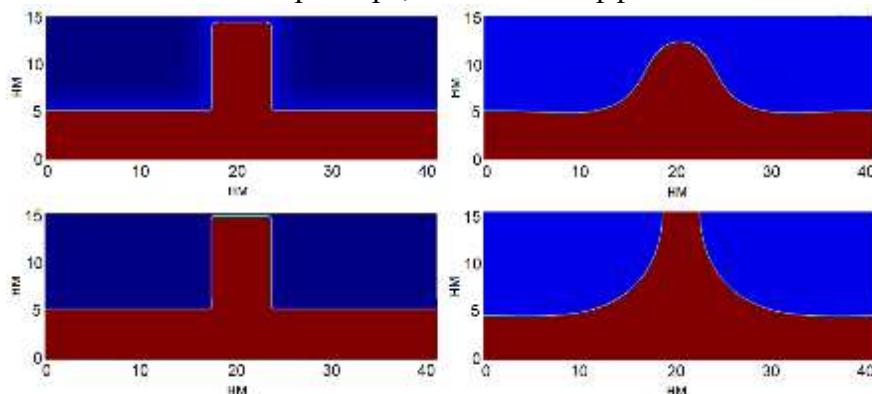


Рисунок 1 – Сценарии эволюции филамента при различных начальных условиях

На заключительном этапе для верификации численной модели было проведено экспериментальное исследование аналогового (многоуровневого) хранения состояния. Измерения характеристик долговременного хранения проводились на тестовых структурах TiO_{2-x} площадью 12×12 мкм. Для каждого образца устанавливалось до 6 различных уровней проводимости (рисунок 3). Полученные экспериментальные результаты подтверждают отсутствие изменений резистивных состояний во времени, предсказываемых диффузией Фика, и подтверждают справедливость предложенной термодинамической модели.



Рисунок 2 – Диаграмма стабильности мемристивной структуры

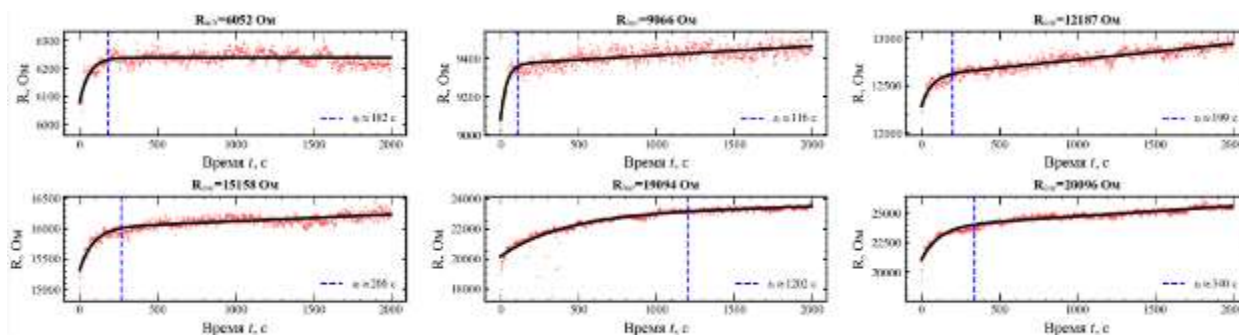


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости резистивных состояний от времени

Заключение

В работе показано, что стабильность проводящего филамента в металлооксидных мемристорах обусловлена термодинамическими эффектами фазового расслоения (спинодального распада). Разработанная модель и ее численная реализация позволяют строить диаграмму стабильности резистивных состояний, определяемых структурно-геометрическим фактором образующегося в процессе формовки филамента, обеспечивая возможность направленной оптимизации характеристик мультибитной резистивной памяти.

Список литературы

1. Ielmini, D. In-memory computing with resistive switching devices / D. Ielmini, H.-S. P. Wong // Nature Electronics. – 2018. – Т. 1. – С. 333-343.
2. Waser, R. Redox-based resistive switching memories — nanoionic mechanisms, prospects, and challenges / R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot // Advanced Materials. – 2009. – Т. 21. – №. 25–26. – С. 2632-2663.
3. Li, Y. Thermodynamic origin of nonvolatility in resistive switching / Y. Li, J. Li, A. Appachar [et al.] // Nature Materials. – 2024. – DOI: 10.1038/s41563-024-01813-6.
4. Cahn, J. W. Free energy of a nonuniform system. I. Interfacial free energy / J. W. Cahn, J. E. Hilliard // The Journal of Chemical Physics. – 1958. – Т. 28. – №. 2. – С. 258-267.

ФОТОДЕТЕКЦИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

БЕЛОУСОВ А.И.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Основной проблемой высокочувствительных фотодетекторов является ограниченный динамический диапазон стандартных линейных усилителей, а также сильная температурная зависимость параметров полупроводниковых элементов. Предложенное схемотехническое решение позволяет осуществлять преобразование фототока в напряжение, пропорциональное его логарифму, что обеспечивает охват диапазона входных оптических мощностей от пикоампер до миллиампер без переключения пределов измерения. Ключевой особенностью разработки является блок термокомпенсации, минимизирующий дрейф выходного сигнала в широком интервале температур.

Ключевые слова: фотодетекция, логарифмический усилитель, операционный усилитель, термокомпенсация

В задачах прецизионной фотометрии, спектроскопии и оптической рефлектометрии часто возникает необходимость регистрации световых потоков, меняющихся по мощности в миллионы и миллиарды раз. Традиционные линейные преобразователи «ток–напряжение» на основе операционных усилителей (ОУ) неспособны обслужить такой диапазон без насыщения при сильных сигналах или потери чувствительности на малых.

Логарифмические усилители решают эту проблему естественным образом, реализуя сжатие входного сигнала: выходное напряжение оказывается пропорциональным логарифму входного тока. Это позволяет наблюдать одновременно и слабые, и мощные сигналы. Однако данному подходу присущ серьёзный недостаток — сильная температурная зависимость параметров р–п перехода, используемого в качестве логарифмирующего элемента. Целью данной работы является разработка практической схемы логарифмического фотоприёмника с активной термокомпенсацией, пригодной для прецизионных измерений в широком интервале температур.

Устройство представляет собой трёхкаскадную структуру на операционных усилителях. Первые два каскада взаимодействуют через эмиттерно-связанную пару биполярных транзисторов, осуществляющую логарифмическое преобразование и вычитание опорного сигнала. Первичным звеном является преобразователь «ток–напряжение», в цепь обратной связи которого непосредственно введён фотодиод; его спектральная чувствительность и темновые характеристики задают границы рабочего диапазона детектора. Фиксация уровня синфазного напряжения на входных зажимах усилителей осуществляется посредством стабилитрона. Выходной каскад, реализованный на третьем операционном усилителе, содержит в контуре обратной связи термистор, что позволяет компенсировать температурную зависимость коэффициента передачи всего тракта.

Два транзистора образуют дифференциальный каскад, выходное напряжение которого U_1 определяется разностью напряжений «база–эмиттер» обоих транзисторов:

$$U_1 = U_{BE1} - U_{BE2} = \varphi \ln(I_{C1}/I_{E01}) - \varphi \ln(I_{C2}/I_{E02})$$

U_{BE} – напряжение «база эмиттер»;

φ – температурный потенциал;

I_{C2} – коллекторный ток;

I_{E02} – обратный ток насыщения;

Поскольку транзисторы согласованы по своим параметрам, полагаем, что токи насыщения транзисторов равны друг другу. В этом случае выражение упрощается к виду:

$$U_1 = \varphi \ln(I_{C1}/I_{C2})$$

В результате, благодаря транзисторной паре температурная зависимость определяется только температурным потенциалом, описываемым $\varphi = kT/q$. Для уменьшения влияния температуры на выходной сигнал воспользуемся упрощенным значением сопротивления терморезистора, а именно: $R_T = 3.5 \cdot T$. Так как терморезистор включен в отрицательную обратную связь выходного каскада, то температуры компенсируют друг друга, а выходной сигнал будет зависеть от фототока на диоде.

Реализовать проект удалось на учебной плате в лабораторной на кафедре ЭПУ. Были использованы стабилитрон TL431, несколько биполярные транзисторы п–р–п типа, резисторы и непосредственно фотодиоды нескольких моделей для сравнения: SFH203P, BPW34 и BPW41N.

Результаты, полученные для различных образцов фотодиодов, продемонстрировали качественно схожий характер и могут быть резюмированы следующим образом.

- В режиме полного затемнения выходной сигнал сохранял квазистационарный уровень со средним значением 3,2 В. При этом наблюдались низкочастотные флуктуации, обусловленные, по-видимому, детектированием фонового излучения малой интенсивности, проникающего в измерительный тракт.
- При естественном дневном освещении среднее значение выходного напряжения сместилось до величины $-0,8$ В, а период осцилляций существенно сократился, что свидетельствует о переходе фотоприёмника в режим с более высокой крутизной преобразования и расширенной полосой пропускания.
- В заключительной серии измерений к основному источнику освещения было добавлено дополнительное излучение. Это привело к дальнейшему снижению регистрируемого напряжения до уровня $-1,2$ В. Частота флуктуаций выходного сигнала при этом достигла максимальных значений среди всех исследованных режимов, что согласуется с теоретическими представлениями об обратной пропорциональной зависимости малосигнального импеданса логарифмирующего элемента от величины протекающего фототока.

Представленное исследование демонстрирует, что задача фотодетекции в широком динамическом диапазоне может быть эффективно решена с помощью относительно несложной аналоговой схемотехники, основанной на принципе логарифмического сжатия сигнала. Ключевыми факторами, обеспечивающими метрологические характеристики устройства, являются дифференциальный принцип построения логарифмирующего ядра и тщательная компенсация температурных эффектов.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что предлагаемая схема использует широкодоступную элементную базу (операционные усилители общего применения, сдвоенные биполярные транзисторы, термисторы, стабилитрон) и не требует сложных процедур настройки. Отсутствие необходимости в цифровой коррекции или микропроцессорном управлении делает устройство привлекательным решением для автономных фотометрических систем, работающих в нестабильных температурных условиях, — портативных спектрометров, измерителей оптической мощности, систем контроля лазерного излучения и волоконно-оптических рефлектометров.

Список литературы

1. Graeme J. Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions. — McGraw-Hill, 1996.
2. Kugelstradt T. Integrated logarithmic amplifiers for industrial applications // *Analog Applications Journal*, 1Q, 2004, pp. 28–33.
3. 4127 Logarithmic Amplifier. PDS-346F. — Texas Instruments // Texas Instruments : официальный сайт. — URL: <https://www.ti.com> (дата обращения: 19.05.2026).
4. Морозов В.П., Бабаян Р.Р. Логарифмический преобразователь фототока с температурной стабилизацией // Датчики и системы. — 2015. — № 8. — С. 43–46.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСИ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ КИСЛОРОДНЫХ ВАКАНСИЙ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТИТАНАТЕ БАРИЯ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

БЕЛЯЕВ Г.1, АНДРЕЕВА Н.В.1, ПЕТУХОВ А.Е.2

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

Аннотация. В рамках данной работы произведены *ab initio* расчёты энергий образования кислородных вакансий в тетрагональной фазе титаната бария. Для расчётов использовался метод функционала плотности (ТФП), реализованный в полнопотенциальном базисе линеаризованных присоединённых плоских волн (ПП-ЛППВ) с использованием программного пакета WIEN2k. Расчет энергии образования кислородной вакансии проводился в суперъячейке $2 \times 2 \times 2$, образованной из элементарных BaTiO_3 ячеек после их оптимизации и релаксации. Расчет энергии образования вакансии по кислороду проведён для монокристалла BaTiO_3 и при введении Fe в решетку в качестве примеси замещения по титану. Показано, что энергия образования кислородной вакансии определяется плоскостью, в которой она образуется (TiO_2 или BaO) в беспримесном BaTiO_3 , а при введении примеси замещения уменьшается на величину, определяемую локальной близостью к атому Fe.

Ключевые слова: титанат бария, вакансия, точечный дефект, ТФП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

1. Введение.

Совершенствование технологии энергонезависимой резистивной памяти во многом обусловлено успехами в области поиска и совершенствования функциональных материалов, в качестве которых выступают нанометровые оксидные слои с воспроизводимыми эффектами резистивного переключения. Одним из перспективных материалов является титанат бария – BaTiO_3 , в котором в тетрагональной фазе присутствует спонтанная поляризация и неэквивалентность кислородных позиций, в совокупности позволяющие задавать предпочтительное направление формирования проводящего филамента из кислородных вакансий при резистивном переключении.

Цель настоящей работы – оценка влияния примеси замещения Fe в позиции Ti (FeTi) на энергию образования вакансии по кислороду (Vo) с использованием *ab initio* расчётов на основе теории функционала плотности (ТФП).

2. Краткое описание методики расчёта

В данной работе расчёты выполнялись в программном пакете WIEN2k [1], реализующем полнопотенциальный метод линеаризованных присоединённых плоских волн (ПП-ЛППВ). Метод итерационный, и окончание расчёта подразумевает сходимость по разным параметрам. Расчёт прекращается, если выполняются условия $|E_n - E_{n-1}| \leq 0,001 R_y$

, $\int d\mathbf{x} |\rho_n(\mathbf{x}) - \rho_{n-1}(\mathbf{x})| \leq 0,01 e$ и $|\mathbf{F}_n^\alpha(\mathbf{x}) - \mathbf{F}_{n-1}^\alpha(\mathbf{x})| \leq 0,001 \frac{R_y}{\text{бор}}$, где нижними индек-

сами обозначены номера итераций, E – полная энергия ячейки, $\rho(\mathbf{x})$ – электронная плотность в точке с радиус-вектором $\mathbf{x}$, $\mathbf{F}^\alpha(\mathbf{x})$ – сила, действующая на атом с номером α , находящийся в точке с радиус-вектором $\mathbf{x}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ – элементарный заряд. Таким образом, параметры сходимости определяют точность расчёта в заданной модели.

Для расчетов параметры ячейки тетрагональной фазы титаната бария задавались в соответствии с данными кристаллографической базы [4] и составляли: $a = b = 3,999\text{\AA}$, $c = 4,017\text{\AA}$. На первом шаге расчетов проводилась оптимизация ячейки по соотношению c/a с постоянным объёмом (c/a в данном случае 1,004), в процессе которой выполнялся расчёт энергии ячейки для различных значений c/a , отличных от изначального, затем по минимуму энергии выбиралась ячейка с оптимальным параметром c/a . Результат расчётов приведён на рисунке 1. Путём интерполирования зависимости энергии ячейки от соотношения c/a находилось положение минимума, соответствующее значению параметров ячейки: $c/a \approx 1,016$, $a = b = 3,9888\text{\AA}$, $c = 4,0392\text{\AA}$.

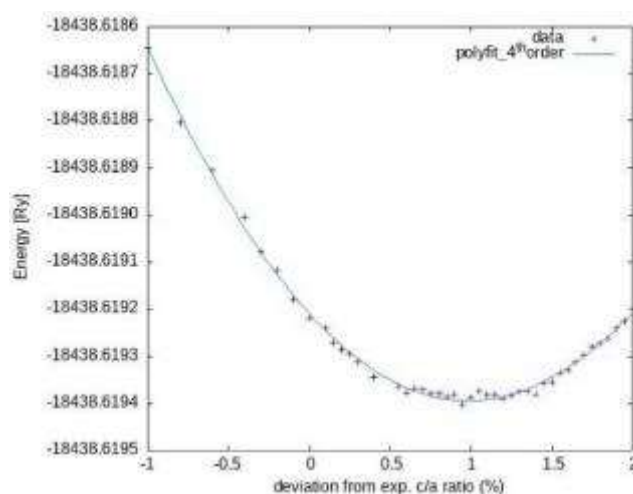


Рисунок 1 – Зависимость энергии ячейки от соотношения c/a .

За этапом оптимизации следовала релаксации ячейки, в процессе которой производился расчет сил, действующих на атомы, и нахождение устойчивого положения, при котором

$\mathbf{F}^\alpha(\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \dots, \mathbf{R}^\alpha, \dots) = -\nabla_{\mathbf{R}^\alpha} E(\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \dots, \mathbf{R}^\alpha, \dots) = \mathbf{0}$, где $E(\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \dots, \mathbf{R}^\alpha, \dots)$ – полная энергия ячейки при расположении атомов с номерами 1, 2, ..., $\alpha, \dots$ в точках с радиус-векторами $\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \dots, \mathbf{R}^\alpha, \dots$. Ячейка с найденным в процессе релаксации расположением атомов, использовалась для построения суперъячейки размером $2 \times 2 \times 2$ (рис. 2), для которой производились расчёты энергии образования кислородной вакансии E_f .

Энергия образования кислородной вакансии определялась в соответствии с выражением:

$$E_f = \left(E_{vac} + \frac{1}{2} E_{O_2} \right) - E_{perfect},$$

где $E_{perfect}$ – энергия суперъячейки без вакансии, E_{O_2} – энергия молекулы кислорода и E_{vac} – энергия суперъячейки с вакансией.

Для расчёта энергии молекулы кислорода рассматривались два атома кислорода на расстоянии $1,2\text{\AA}$ (соответствующем длине связи в молекуле O_2 [3]) в центре пустой ячейки. Размер пустой ячейки соответствовал размеру расчетной суперъячейки титаната бария ($2 \times 2 \times 2$) и составлял $7,9776 \times 7,9776 \times 8,0784\text{\AA}$. Расчёты энергий образования кислородных вакансий в суперъячейке $BaTiO_3$ с примесью Fe_{Ti} производились аналогично расчётам для

монокристалла. Структуры суперъячеек приведены на рисунках 2 и 3, а результаты расчётов – в таблице 1.

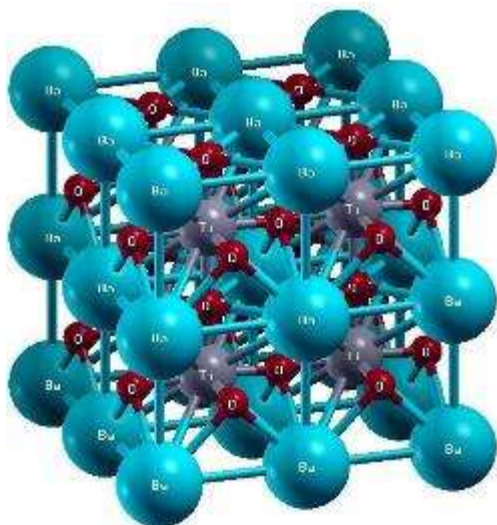


Рисунок 2 – Суперъячейка титаната бария $BaTiO_3$

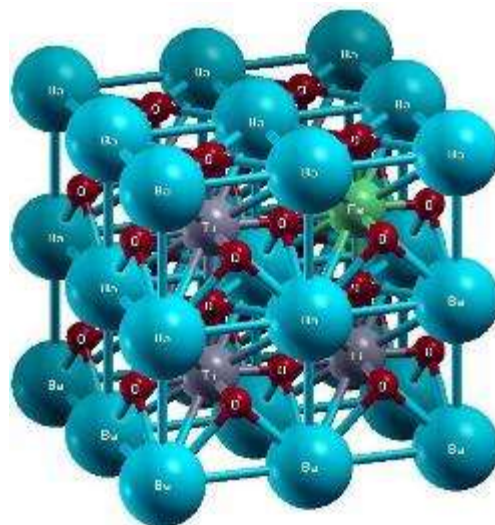


Рисунок 3 – Суперъячейка титаната бария $BaTiO_3$ с примесью железа Fe в позиции Ti

Таблица 1

Энергия образования кислородной вакансии, E_f

	$BaTiO_3$, VO в TiO_2 - плоскости	$BaTiO_3$, VO в BaO - плоскости	$BaTiO_3$ с $FeTi, VO$ в TiO_2 -плос- кости (1 коорд. сфера Fe)	$BaTiO_3$ с $FeTi, VO$ в BaO -плос- кости (2 коорд. сфера Fe)	$BaTiO_3$ с $FeTi, VO$ в TiO_2 -плос- кости (4 коорд. сфера Fe)	$BaTiO_3$ с $FeTi, VO$ в BaO -плос- кости (3 коорд. сфера Fe)
E_f , эВ	5,95	5,22	4,16	3,61	5,27	5,18

Таким образом, на основе ТФП-расчётов установлено, что в тетрагональной фазе монокристаллического $BaTiO_3$ энергия образования кислородной вакансии составляет 5,95 эВ и 4,85 эВ в плоскостях TiO_2 и BaO , соответственно. Разница в энергиях образования обусловлена характером связей кислорода с катионами (TiO_2 – ковалентный, а BaO – ионный). Образование вакансии в BaO -плоскости предпочтительно энергетически. С добавлением примеси железа энергии образования кислородной вакансии снижаются до 4,16 эВ в TiO_2 -плоскости и до 3,61 эВ в BaO -плоскости. Этот эффект является локальным, и на расстоянии четвертой координатной сферы от примеси замещения по титану энергия образования кислородной вакансии приближается к рассчитанному значению для беспримесной структуры. Полученные результаты показывают, что легирование железом может служить эффективным инструментом управления пространственным распределением кислородных вакансий в сегнетоэлектрическом $BaTiO_3$, позволяя рассчитывать на возможность контролируемого влияния на процесс образования филаментов при резистивном переключении в мемристивных устройствах на основе тонких монокристаллических пленок титаната бария.

Список литературы

1. Peter Blaha, Karlheinz Schwarz, Fabien Tran, Robert Laskowski, Georg K. H. Madsen, Laurence D. Marks; WIEN2k: An APW+lo program for calculating the properties of solids. J. Chem. Phys. 21 February 2020; 152 (7):

074101.

2. Paul Erhart, Karsten Albe; Thermodynamics of mono- and di-vacancies in barium titanate. J. Appl. Phys. 15 October 2007; 102 (8): 084111. <https://doi.org/10.1063/1.2801011>

3. Chieh, Chung. "Bond Lengths and Energies". University of Waterloo.

4. www.crystallography.net

СПОСОБ УТОНЕНИЯ МЕМБРАН КРЕМНИЕВЫХ ФПЗС

БЕЛЯЕВ Г.С.1, СОКОЛОВА А.А.2

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ
им. В.И. Ульянова (Ленина), ²АО Центральный научно-исследовательский институт “Электрон”, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Утонение кремниевых мембран играет важную роль в производстве ФППЗ и оказывает сильное влияние на рабочие характеристики устройства. Рассмотрена технология утонения на основе комбинированного использования лазера и химического дотравливания. Исследованы основные типы дефектов данной технологии. В работе предлагается альтернативный способ утонения мембран, который позволяет избежать полностью или частично имеющиеся дефекты нынешней технологии.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, мембрана, утонение, химическое травление, лазерное утонение.

Введение

Тонкие кремниевые мембраны — ключевой элемент современных фоточувствительных приборов. Их качество напрямую определяет рабочие характеристики устройств: дефекты структуры снижают чувствительность, ухудшают изображение и нарушают стабильность электрических параметров и т.д.

Технология производства фоточувствительных приборов с переносом заряда (ФППЗ) за последние несколько десятков лет не претерпевала значительных изменений. Основной вектор работ сейчас направлен на увеличение количества фоточувствительных элементов, надежности устройств, стойкости к радиации, чувствительности и быстродействия и т.п. Для повышения чувствительности и быстродействия ПЗС-матриц необходимо утонить кремниевую подложку с обратной стороны кристалла в области фоточувствительной области.

В данной работе представлена разработка нового метода равномерного утонения фоточувствительной мембраны, которая позволит устранить представленные в работе дефекты, тем самым повысив процент выхода годных изделий и улучшив эксплуатационные характеристики приборов.

Технологии утонения мембран

На сегодняшний день известны несколько способов утонения мембран и все их можно разделить на сухое и жидкое травление. К сухому можно отнести механическую шлифовку, лазерное утонение, плазмохимическое, ионное и ионно-химическое травления. Жидкое травление в свою очередь можно разделить на изотропное в растворе HNA (азотная, плавиковая и уксусная кислоты) и анизотропное в щелочных растворах KOH, TMAN (гидроксид тетраметиламмония). Но также возможна комбинация сухого и жидкого травления, для достижения наилучшего результата.

Каждый из растворов имеет свои преимущества: HNA (самый распространенный травитель для кремния) позволяет достичь гладкую поверхность и обеспечивает высокую селективность, также варьируя состав раствора можно регулировать скорость травления и

использовать для создания углублений в кремниевой пластине, например микрофлюидных каналов; КОН гарантирует высокую воспроизводимость скорости травления; ТМАН не оставляет металлических загрязнений и позволяет контролировать процесс утонения за счет низкой скорости травления. Ионно-химическое травление хоть и позволяет достичь равномерность мембраны со средним отклонением толщины около 2,25% [3], но часто приводит к поверхностным деформациям и значительно дороже в использовании.

Рассмотрим в качестве примера технологию утонения мембраны ПЗС-матриц на АО «ЦНИИ «Электрон». В настоящее время используется комбинированный способ утонения мембран – лазерное утонение плюс жидкое химическое травление. Лазер (в красном спектре) позволяет утонить кристалл с 550-570 мкм до толщины примерно 100 мкм для формирования окна, которое задает будущий контур травления. Со стороны матрицы наносится фоторезист для защиты, затем кристалл помещают в специальную оснастку, которая оставляет открытой только область мембраны, после его помещают в химическую ванну и с помощью травления в растворе HNA (1:3:10) утоняют до необходимой толщины в 20 мкм, которая определяется глубиной эпитаксиального слоя. Находясь в химической установке, оснастка вращается в двух плоскостях: вокруг оси самого кристалла вокруг вертикальной оси

Вышеописанная технология имеет ряд недостатков, которые приводят к дефектам, которые ухудшают рабочие характеристики прибора. В данной работе предложены способы устранения имеющихся дефектов и разработка нового способа утонения мембран.

Исследование дефектов структуры и рекомендации по их устранению

Мембрана имеет прямоугольную форму, и даже с учетом того, что лазер формирует будущую область травления, углы могут оказаться недотравленными из-за неравномерного взаимодействия травителя с мембраной во всех областях (рис.1).

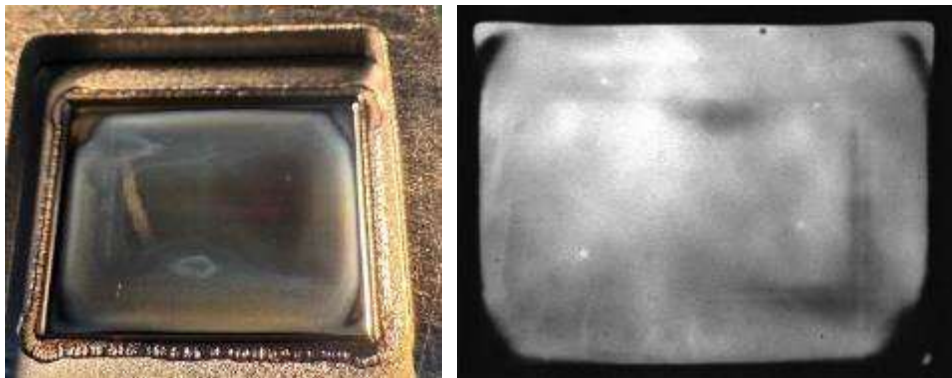


Рис.1. Дефект недотравленных углов на мембране: фото мембраны (слева) и полученное с помощью данной матрицы изображение (справа)

Но возможен и обратный эффект – перетравленные углы, и если в первом случае у матрицы будет наблюдаться дефект изображения, то втором случае она может потерять свои свойства по переносу заряда и выйти из строя. Избежать данного дефекта можно путем отказа от вращательного движения в химической и перейти к вертикальному расположению кристалла с возвратно-поступательным движением в травителе. В условиях отсутствия автоматизации допустим вариант горизонтального расположения кристалла, но данная технология подразумевает ручное перемешивание раствора.

Следующим дефектом является образующаяся на мембране пленка из-за продуктов реакции (рис.2). Она превращает гладкую и прозрачную мембрану в более матовую, что

ухудшает пропускание света к фоточувствительной области. Для уменьшения толщины образующейся пленки необходимо отказаться от одноэтапного химического травления и перейти к многоступенчатому с использованием разных растворов. В качестве травителя будем использовать раствор HNA, но в зависимости от этапа травления будем менять соотношения кислот: травитель №1 – самый жесткий имеет соотношение 10:1.5:4, в травителях №2, 3 и 4 увеличиваем количество уксусной кислоты и далее подбираем необходимый баланс между азотной и плавиковой кислотами для наиболее эффективного растворения образующегося в ходе реакции оксида кремния. С увеличением концентрации уксусной кислоты скорость травления будет падать с 5.5 мкм/мин до 0.8 мкм/мин. Также рекомендовано использование неионных ПАВ и регуляторов окислительно-восстановительных реакций.



Рис.2. Пленка на поверхности мембраны: фото мембраны (слева) и полученное с помощью данной матрицы изображение (справа)

Из-за недостаточной защиты матрицы только фоторезистом на ней могут образовываться эрозионные химические повреждения (подтравы на поверхности всей матрицы) (рис.3).

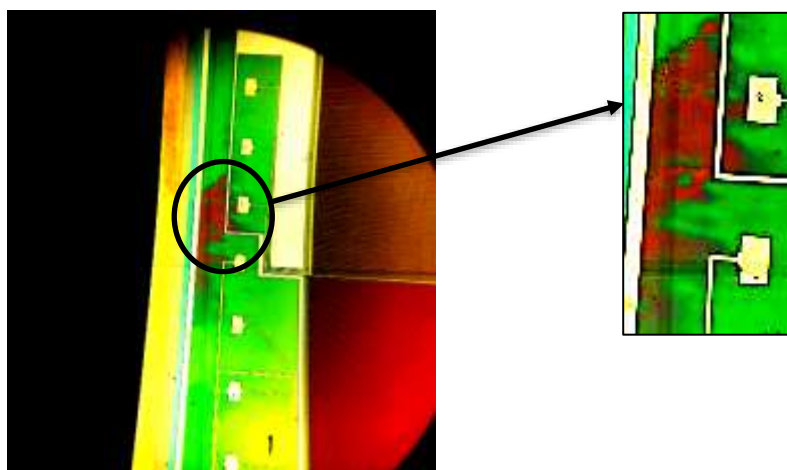


Рис.3. Фото эрозионного химического повреждения на матрице ФППЗ

В качестве дополнительной защиты матрицы, как вариант можно использовать помимо фоторезиста химически стойкий лак, который легко удаляется в органических растворителях, например диметилформамид и моноэтаноламин.

Ряд дефектов вносит и сама лазерная установка: сетка на мембране (рис.4), профиль которой повторяется при химическом травлении; микротрещины из-за быстрого нагрева и охлаждения; дополнительные дефекты кристаллической решетки (вакансии и дислокации); загрязнения в виде частиц кремния после снятия. Данные дефекты можно избежать путем полного отказа от использования лазера в технологии производства.

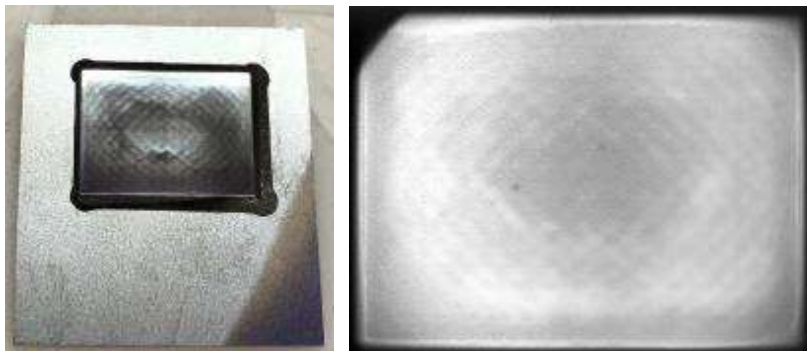


Рис.4. Дефект сетки на мембране матричного ПЗС, после обработки лазером: фото мембраны (слева) и полученное с помощью данной матрицы изображение (справа)

Используя новую методику, включающую отказ от лазера и использование только жидкого химического травления, была получена мембрана, демонстрирующая улучшенное качество изображения (рис.5)

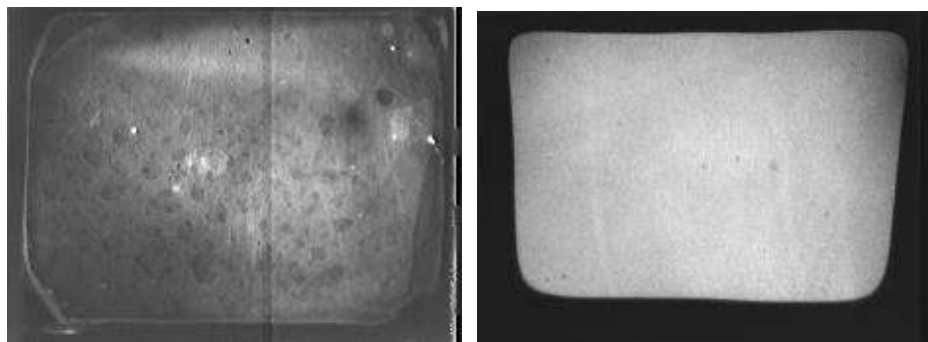


Рис.5. Изображение, передаваемое прибором в составе с матрицами по старой (слева) и альтернативной (справа) технологиям

Заключение

Проанализировав основные дефекты, можно сделать следующие выводы:

- Полный отказ от лазера;
- Переход на многоэтапное травление с разными составами травителя;
- Нанесение дополнительной защиты на матрицу;
- Изменение траектории движения кристалла в травителе.

Предложенный метод утонения мембран, учитывающий вышеперечисленные рекомендации, позволит решить сразу несколько проблем: повышение равномерности мембраны, уменьшение плотности дефектов, а также улучшение рабочих характеристик прибора (уровень усиления (G) возрос с средним от 92 до 363).

Список литературы

1. Deepu B.R., Venkatachalam P., Mirji F.N., Littin V., Naveen H., Savitha P., Basavaraju Y.B. A Surface Micromachining: HNA Etchant for Stiction-free Release of Micro/Nanomechanical Structures // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 42, Part 2. P. 1218–1223.

2. Dewangan P., Purohit S., Sahu V., Vardhan R.V., Peddigari M., Pal P. Fabrication of the microfluidic channels in silicon wafers using isotropic wet etching method: the impact of the composition of HNA solution on etching // *Microsystem Technologies*. 2025. Vol. 31, No. 1. P. 63–73.
3. Nabipour M., Majlis B. Yeop. High-Precision Thickness Control of Silicon Membranes Using Etching Techniques // *Proceedings of the International Conference on Semiconductor Electronics*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2006. P. 185-187.
4. Zhou C., Li J., Wu L., Guo G., Wang H., Chen P., Yu B., Qian L. Friction-induced selective etching on silicon by TMAH solution // *RSC Advances*. 2018. Vol. 8. P. 36043-36048.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ НАНОАЛМАЗОВ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

БОБКОВ А.А.¹, МИТРОФАНОВ М.И.², КОЗОДАЕВ Д.А.³

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

²*ФТИ им. А.Ф. Иоффе*

³*ООО «Активная Фотоника»*

Аннотация. В работе с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (Рамановской спектроскопии) и фотолюминесценции было проведено экспериментальное исследование порошков ультрадисперсных алмазов, полученных методом детонационного и статического синтеза. Спектры комбинационного рассеяния показали различное соотношение углеродных и алмазных фаз между образцами. Также продемонстрировано, что охлаждение образцов позволяет выделить из широкой полосы люминесценции отдельные максимумы для идентификации дефектов в наноалмазах.

Ключевые слова: спектроскопия комбинационного рассеяния, Рамановская спектроскопия, люминесценция, ультрадисперсные алмазы, детонационные наноалмазы, наноалмазы статического синтеза

Введение

Наноалмазы представляют интерес для применения в различных областях – от материаловедения до медицины [1]. Исследование структурных свойств наноалмазов имеет ключевое значение для понимания их уникальных характеристик и расширения областей применения, позволяет оптимизировать их синтез и модифицирование [2]. Ультрадисперсные алмазные порошки могут включать наноалмазы с размерами от единиц до сотен нанометров. Для синтеза наноалмазов могут быть использованы различные методы, такие как детонационный, лазерная абляция, метод статического синтеза, рост из газовой фазы и другие [3]. Сами наноалмазы могут быть как в оболочке для предотвращения агрегирования, так и очищены от неё. В зависимости от метода синтеза и технологических параметров наноалмазы могут обладать различными структурными характеристиками, которые можно исследовать методами оптической спектроскопии. В работах [2, 4] метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (Рамановской спектроскопии) использовался для анализа алмазной (sp^3) и углеродной (sp^2) фазы в детонационных наноалмазах и наноалмазах статического синтеза. В работе [5] спектры люминесценции сопоставлялись с размерами наноалмазов. С помощью низкотемпературной фотолюминесценции в работах [6, 7] исследовались люминесцентные свойства Si-V дефектов в наноалмазах, выращенных газofазным методом.

В нашей работе методом Рамановской спектроскопии проведено исследование ультрадисперсных порошков детонационных наноалмазов (ДНА) с углеродной оболочкой,

очищенных ДНА и наноалмазов статического синтеза (НСС). Также методом фотолюминесценции проведено исследование ультрадисперсных порошков очищенных наноалмазов при охлаждении жидким азотом.

Эксперимент

Для исследования использовались порошки детонационных наноалмазов с углеродной оболочкой и очищенные от неё, а также порошки наноалмазов, полученные методом статического синтеза. Исследования проводились на системе NTEGRA Spectra производства ООО «Активная Фотоника». Для охлаждения образцов использовался наливной криостат, образцы порошков наноалмазов располагались на медном теплоотводе, который охлаждался жидким азотом. Температура порошков наноалмазов не контролировалась. Исследования образцов проводились при возбуждении лазерным излучением 405 нм и 532 нм с мощностью возбуждения 260 и 435 мВт соответственно. Фокусировка излучения осуществлялась микрообъективом со 100 кратным увеличением и числовой апертурой 0.7. Диаметр сфокусированного лазерного излучения составлял примерно 2 мкм для 405 нм и 4 мкм для 532 нм, соответственно плотность мощности составляла 165 кВт/см² и 138.5 кВт/см².

Обсуждение экспериментальных данных

На рисунке 1 слева приведены спектры КР от ДНА с углеродной оболочкой и очищенных ДНА. Отсутствие максимума алмазной фазы (sp^3 гибридизация) в спектре КР от ДНА с углеродной оболочкой и наличие типичных для углерода полос (D и G (sp^2 гибридизация)) свидетельствует о том, что толщина оболочки достаточна для полного поглощения оптического излучения. В спектре КР от очищенных ДНА присутствует как максимум алмазной фазы (1330 см^{-1}), так и максимум углеродной фазы (1586 см^{-1}). Причём интенсивность G максимума больше, что свидетельствует либо о недостаточной очистке ДНА, либо о присутствии в порошке большого числа графитовых частиц.

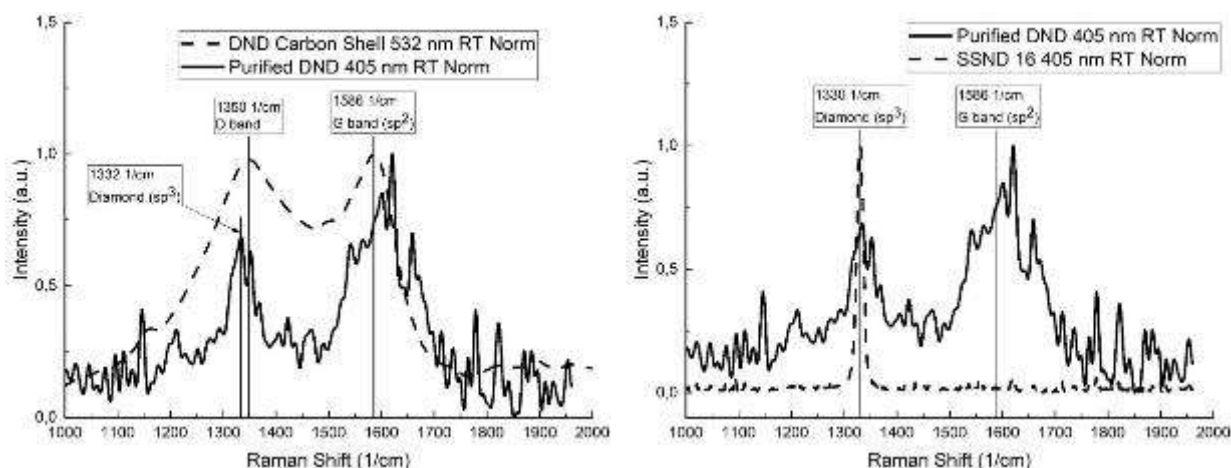


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния для порошков детонационных наноалмазов с углеродной оболочкой (DND Carbon Shell) и очищенных детонационных наноалмазов (Purified DND) – слева и Спектры комбинационного рассеяния очищенных детонационных наноалмазов (Purified DND) и детонационных наноалмазов статического синтеза (SSND) - справа

На рисунке 1 справа приведены спектры КР и люминесценции от очищенных ДНА и НСС. Наноалмазы статического синтеза не обладают sp^3 фазой. Ширина и интенсивность максимума sp^3 фазы НСС в несколько раз больше, чем у ДНА, что, согласно работе [5] может свидетельствовать о существенных различиях в размерах наноалмазов – от 100 нм для статического синтеза и 5-50 нм для ДНА.

На рисунке 2 слева приведены спектры фотолюминесценции очищенных ДНА и НСС. Интенсивность люминесценции выше у наноалмазов статического синтеза. Что, скорее всего, является следствием поглощения на остаточном углероде.

На рисунке 2 справа показаны спектры фотолюминесценции НСС, зарегистрированные при комнатной температуре и при охлаждении жидким азотом. Отчётливо видно сужение спектральных линий люминесценции. В таблице 1 приведены идентифицированные максимумы люминесценции и возможные дефекты, согласно данным, приведённым в работе [5].

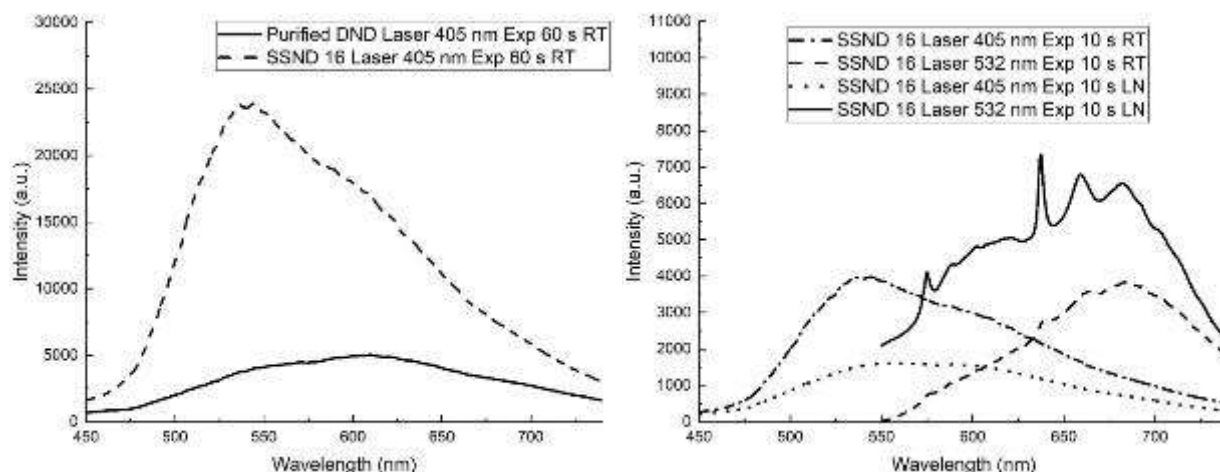


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции очищенных детонационных наноалмазов (Purified DND) и детонационных наноалмазов статического синтеза (SSND), зарегистрированные при комнатной температуре – слева, Спектры фотолюминесценции НСС, зарегистрированные при комнатной температуре (RT) и при охлаждении жидким азотом (LN) - справа

Таблица 1

Идентификация дефектов наноалмазов по данным из работы [5]

Длина волны (нм)	Структурные дефекты
543	-
575	N-V ⁰
601	дефекты, связанные с дивакансиями
620	-
637	N-V ⁻ (безфононная полоса)
660	N-V ⁻ (фононная полоса), дефекты, связанные с дивакансиями
680	N-V ⁻ (фононная полоса), дефекты, связанные с дивакансиями

Заключение

Оптические методы рамановской спектроскопии и фотолюминесценции являются мощными методами структурного анализа наноалмазов особенно при исследованиях в широком температурном диапазоне. Для оптических методов исследования порошки ДНА необходимо очищать от углеродной оболочки и углеродных включений, чтобы уменьшить поглощение возбуждающего излучения. Анализ спектров КР детонационных наноалмазов и наноалмазов статического синтеза показал возможное различие в размерах наноалмазов. Снижение температуры образцов позволило сузить спектральные полосы люминесценции и более чётко идентифицировать дефектную структуру НСС. Добиться

сужения спектральных линий для порошка очищенного ДНА не удалось, возможно из-за недостаточного охлаждения.

Благодарности

Коллектив авторов благодарит Долматова В.Ю. из ФГУП «СКТБ «Технолог» за предоставленные для исследования образцы ультрадисперсных наноалмазов.

Список литературы

1. Dolmatov V.Yu., Shames A.I., Ōsawa E., Vehanen A., Myllymäki V., Dorokhov A.O., Martchukov V.A., Kozlov A.C., Naryzhny S.Yu., Smirnova A.Z.. Detonation nanodiamonds: from synthesis theory to application practice. Journal of Advanced Materials and Technologies. 2021;6(1):54-80. DOI: 10.17277/jamt.2021.01.pp.054-080
2. Dolmatov, V.Y., Lapchuk, N.M., Lapchuk, T.M. et al. A study of defects and impurities in doped detonation nanodiamonds by EPR, Raman scattering, and XRD methods. J. Superhard Mater. 38, 219–229 (2016). <https://doi.org/10.3103/S1063457616040018>
3. Mochalin, V., Shenderova, O., Ho, D. et al. The properties and applications of nanodiamonds. Nature Nanotech 7, 11–23 (2012). <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.209>
4. Михеев К.Г., Шендерова О.А., Когай В.Я., Могилева Т.Н., Михеев Г.М., Раман-спектры наноалмазов детонационного и статического синтеза и влияние лазерного воздействия на их спектры люминесценции, Химическая физика и мезоскопия, том 19, №3, 2017
5. P.-H. Chung, E. Perevedentseva, C.-L. Cheng, The particle size-dependent photoluminescence of nanodiamonds, Surface Science, Volume 601, Issue 18, 2007, Pages 3866-3870, ISSN 0039-6028, <https://doi.org/10.1016/j.susc.2007.04.150>.
6. Пастернак Д. Г., Даи Д., Калашников Д.А., Мартьянов А. К., и Седов В. С., Низкотемпературная люминесценция одиночных SiV-центров в индивидуальных CVD наноалмазах, Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели», no. 1, 2020, pp. 19-21. doi:10.24412/cl-35673-2020-1-19-21
7. Пастернак Д.Г., Калашников Д.А., Леонг В, Чиа К., Ромшин А.М., Кузнецов С.В., Мартьянов А.К., Седов В.С., Кривицкий Л.А., Власов И.И., Люминесцентные свойства индивидуальных центров "кремний-вакансия" в CVD-наноалмазах, выращенных на различных подложках, Оптика и спектроскопия, выпуск 2, стр. 233, 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ

БОГДАНОВА Э.Д.¹, НЕУСТРОЕВ И.Д.²

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

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования механических свойств композитных СВЧ материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), наполненных керамическими порошками с высокой диэлектрической проницаемостью. Рассмотрено влияние типа, концентрации и состава наполнителей (TiO_2 , CaTiO_3 , NbO_2 , CeO_2 , твёрдые растворы $\text{LaAlO}_3\text{--CaTiO}_3$) и их смесей на прочность при растяжении. Установлены закономерности изменения механических свойств при высоких концентрациях наполнения, определены оптимальные комбинации наполнителей, обеспечивающие приемлемый уровень прочности при заданных значениях диэлектрической проницаемости и уровня потерь в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, композиционные материалы, механические свойства, керамические наполнители, прочность при растяжении.

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

Введение

Развитие СВЧ-систем миллиметрового диапазона предъявляет жесткие требования к диэлектрическим материалам, используемым при производстве СВЧ печатных плат.

Необходимы подложки с высокой добротностью, стабильной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 4\text{--}10$) и одновременно достаточной механической прочностью. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) благодаря высокой температуростойкости и низким потерям ($\tan\delta < 0,002$) является предпочтительным материалом основы для СВЧ-композитов [1, 2]. Однако достижение значений $\epsilon > 4$ требует введения большого объема керамического наполнителя (часто свыше 50–60 мас.%) [3, 4], что радикально ухудшает механические характеристики: материал становится хрупким, снижается прочность, уменьшается относительное удлинение, возникает склонность к растрескиванию и разрушению при механической обработке [5]. Такое поведение во многом обусловлено низкой поверхностной энергией ПТФЭ, являющейся следствием его химической инертности. В связи с этим исследование механических свойств композитов ПТФЭ с различными керамическими добавками является актуальной задачей, направленной на поиск составов, сочетающих высокую диэлектрическую проницаемость с приемлемыми механическими характеристиками.

Методы изготовления образцов

Экспериментальные образцы композитного материала были изготовлены методом компрессионного прессования. В качестве диэлектрической матрицы применяли порошок ПТФЭ Ф-4 (основная фракция ~ 25 мкм). Керамическими наполнителями служили TiO_2 , CaTiO_3 , NbO_2 , CeO_2 и твёрдый раствор системы $\text{LaAlO}_3\text{--CaTiO}_3$ (АЛТК) и их смеси в различных концентрациях.

Смешивание порошка фторопласта с керамическим наполнителем после предварительного разрыхления и сушки проводилось с использованием высокоскоростного лопастного лабораторного смесителя (до 800 об/мин). Затем на лабораторном гидравлическом прессе изготавливались экспериментальные образцы материала. На последнем этапе образцы подвергались термообработке: производился постепенный нагрев заготовки до температуры, превышающей 342°C (температуру плавления кристаллитов фторопласта), выдержка при максимальной температуре $380 \pm 10^\circ\text{C}$ и последующее охлаждение в печи. Готовые пластины толщиной $1,0 \pm 0,1$ мм выдерживали при 23°C не менее 2–3 суток, после чего из них вырезали образцы размером 50×20 мм для механических испытаний.

Методика измерений механических свойств

Механические испытания изготовленных образцов композитного материала на растяжение выполняли по ГОСТ 11262–2017, ГОСТ 32656–2017 и ГОСТ 33693–2015 на универсальной машине ТРМ-О 5 А0,5 Tochline с максимальным усилием 5 кН и погрешностью датчика силы 0,5 %. В процессе нагружения непрерывно регистрировали нагрузку и удлинение. По полученным диаграммам определяли предел прочности σ_r .

Для композитов с объёмной долей наполнителя свыше 25–30 % на губки зажимов устанавливали резиновые накладки, чтобы избежать преждевременного разрушения в местах крепления. Испытания проводили для серии из пяти образцов каждого состава.

Результаты и их анализ

На рисунке 1 представлены зависимости прочности при растяжении СВЧ композитов на основе ПТФЭ от объёмной доли различных наполнителей: TiO_2 , CaTiO_3 , NbO_2 , CeO_2 , а также твёрдых растворов системы $\text{LaAlO}_3\text{--CaTiO}_3$ (АЛТК). Механические свойства ПТФЭ существенно изменяются при введении керамических наполнителей из-за слабого взаимо-

действия сил Ван-дер-Ваальса между молекулами ПТФЭ и частицами вводимых порошков. Вместе с прочностью на разрыв критически снижается относительное удлинение – с 350% (у чистого ПТФЭ) до 50-150% у композитов.

Наибольшую механическую прочность при растяжении продемонстрировали образцы с добавками CeO_2 и NbO_2 (до 5 об.%). Малые добавки наполнителя способны незначительно увеличить предел прочности. Такое упрочнение обусловлено структурной модификацией полимера и эффективным перераспределением напряжений. Мелкодисперсные частицы выступают центрами структурообразования, способствуя формированию более однородной мелкосферолитной морфологии и эффективно тормозя распространение микротрещин. Превышение этого порога приводит к агрегации частиц, которые становятся дефектами и снижают прочность.

Введение АЛТК и TiO_2 в ПТФЭ приводит к монотонному снижению прочности на разрыв и значительному уменьшению относительного удлинения – материал становится хрупким. Такой характер изменения механических свойств типичен для жёстких керамических наполнителей и объясняется слабой адгезией на границе раздела фаз.

При использовании в качестве наполнителя титаната кальция (CaTiO_3) снижение прочности происходит значительно быстрее из-за высокой жесткости и специфической формы кристаллов наполнителя. Это обусловлено большим объёмом кристаллической ячейки ($\sim 224 \text{ \AA}^3$) из-за крупных ионов Ca^{2+} . Каждая частица CaTiO_3 является значительным структурным дефектом, при растяжении нагрузка концентрируется на тонких полимерных перемычках между частицами титаната кальция, а сами твёрдые включения физически блокируют формирование «фибриллярной» структуры ПТФЭ, ответственной за его высокую прочность.

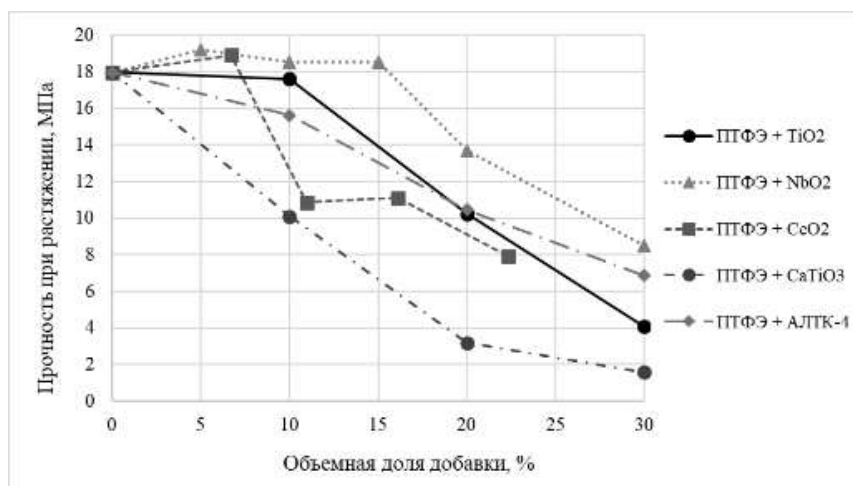


Рис. 1. Изменение прочности композитного материала на основе ПТФЭ при введении различных наполнителей.

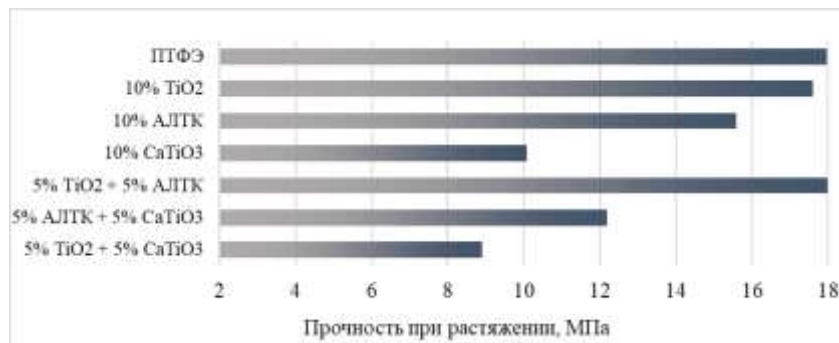
Дополнительно были исследованы механические свойства трёхкомпонентных СВЧ композитов на основе ПТФЭ, содержащих смеси наполнителей АЛТК (5 мкм) TiO_2 (20 мкм) и CaTiO_3 (2 мкм). Результаты испытаний на растяжение при суммарной объёмной доле наполнителей 10 и 20 % представлены на рисунке 2 а и б соответственно.

Комбинация двух видов керамики TiO_2 + АЛТК улучшает упаковку частиц в полимерной матрице: мелкие частицы АЛТК заполняют промежутки между более крупными частицами TiO_2 (бимодальное распределение). В результате полученный трехкомпонентный

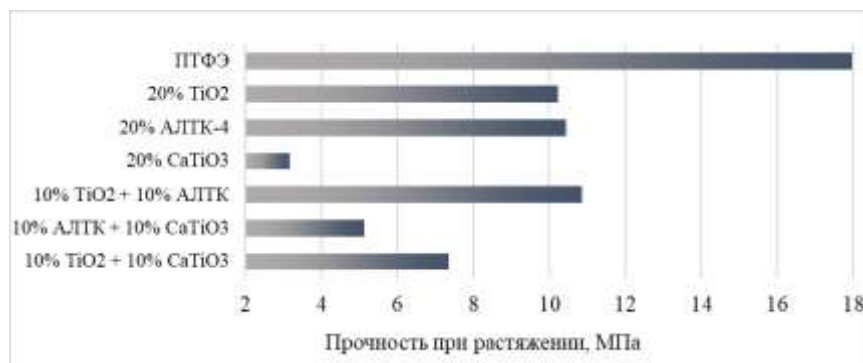
композит обеспечивает максимальную жёсткость в сравнении двухкомпонентными на основе добавок TiO_2 и АЛТК, практически исключая хладотекуемость.

В системе $\text{TiO}_2 + \text{CaTiO}_3$ положительный эффект также даёт бимодальное распределение частиц: мелкие частицы CaTiO_3 заполняют промежутки между более крупными частицами TiO_2 , повышая однородность и снижая пористость. В результате прочность при использовании смеси падает медленнее, чем у чистого CaTiO_3 , что объясняется лучшей морфологической совместимостью диоксида титана с фторопластом. Комбинация $\text{CaTiO}_3 + \text{АЛТК}$ смещает механические свойства в сторону характеристик чистого титаната кальция, снижая прочность материала, ввиду отсутствия бимодального распределения частиц.

Обобщая результаты механических испытаний двух- и трёхкомпонентных композитов на основе ПТФЭ, можно заключить, что введение керамических наполнителей всегда снижает пластичность полимерной матрицы, однако характер изменения прочности и жёсткости определяется типом, концентрацией и комбинацией добавок. В двухкомпонентных системах при малом наполнении (до 10 об. %) наилучшее сохранение прочности и даже её локальное увеличение достигается при использовании TiO_2 , CeO_2 и NbO_2 , тогда как частицы CaTiO_3 ускоряют потерю прочности. Применение многокомпонентных смесей, основанных на бимодальном распределении частиц по размеру, позволяет повысить плотность упаковки и заметно улучшить жёсткость. При этом комбинация TiO_2 и CaTiO_3 обеспечивает более медленное падение прочности на разрыв, чем использование чистого CaTiO_3 , а введение добавок на основе АЛТК делает композит максимально жёстким и практически не склонным к хладотекуемости, хотя и приводит к дополнительной хрупкости.



а)



б)

Рис. 2. Механическая прочность образцов композитного материала на основе ПТФЭ при 10% и 20% наполнении

В ходе проведенного исследования было установлено, что наилучшие механические свойства демонстрирует трехкомпонентный композитный материал на основе смеси керамических наполнителей TiO_2 + АЛТК. При концентрациях вводимого наполнителя на уровне 10-20 об. % диэлектрические характеристики такого материала, измеренные на частоте 10 ГГц, лежат в диапазоне $\epsilon = 3.5-6$, $\text{tg}\delta < 0,0008$. что делает его перспективным для производства СВЧ плат.

Список литературы.

1. Polytetrafluoroethylene composites for high-frequency microwave applications: balancing thermal conductivity, adhesion and dielectric properties/ He L., Zhang Y., Liu X. et al. // Composites Science and Technology. – 2025. – Т. 261. – С. 111012.
2. Tong C. PCB materials and design requirements for 5G systems // Advanced materials and components for 5G and beyond. Cham : Springer Nature Switzerland. – 2022. С. 77–108.
3. Microwave dielectric properties of PTFE/rutile nanocomposites/ Rajesh S., Murali K. P., Sreekumar P. A. et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Т. 477. – №. 1–2. – С. 677–682.
4. Modified BCZN particles filled PTFE composites with high dielectric constant and low loss for microwave substrate applications/ Wang H., Liu Y., Zhang X. et al. // Ceramics International. – 2020. – Т. 46. – №. 6. – С. 7531–7540.

Исследование свойств композитного материала для СВЧ-применений на основе PTFE с различной концентрацией и размером частиц керамического наполнителя/ Козырев А. Б., Соколов В. А., Иванов Д. С. и др. // Известия высших учебных заведений России. Радио-электроника. – 2023. – Т. 26. – №. 2. – С. 16–24.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

БРЫЗГАЛОВ В.Л., КОСТИН Р.О., ШИШКИНА М.Н.

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Представлен разработанный авторами программный комплекс, предназначенный для автоматической обработки данных физических экспериментов, который реализует алгоритмы статистической обработки результатов прямых, косвенных и совместных измерений. Разработаны алгоритмы: автоматического дифференцирования функции; построения и анализа графических зависимостей различного вида.

Ключевые слова: программный комплекс, статистическая обработка результатов эксперимента, прямые, косвенные и совместные измерения, погрешности физических измерений, выборка.

Реальные физические эксперименты требуют многократные наблюдения тех или иных физических величин, формирующих определенную выборку результатов наблюдений. Статистическая обработка полученных данных по определенным алгоритмам предполагает нахождение результата измерений с оценкой погрешности измерений [1].

Многократная обработка результатов наблюдений, особенно часто выполняемая студентами в технических вузах, сопряжена с выполнением большого количества однотипных вычислительных операций. Чтобы упростить и автоматизировать процессы обработки экспериментальных данных физических экспериментов авторами данной работы был разработан программный комплекс, который удовлетворяет следующим требованиям: - инструменты комплекса удобны в использовании; - работа алгоритмов

наглядна; - операции ввода данных и копирования результатов вычислений просты в реализации.

При разработке программного комплекса использовались: веб-фреймворк Vue [2] - для создания интерфейса, библиотека Decimal.js [3] - для снижения компьютерных ошибок в промежуточных вычислениях, а также MathLive [4] - для отображения и ввода формул в формате LaTeX.

Пользовательский интерфейс комплекса достаточно прост. Основным элементом навигации, размещенным в верхней панели, является переключатель разделов: прямые измерения; косвенные измерения; совместные измерения.

На рисунке 1 представлена функциональная схема, разработанного авторами программного комплекса. Блок «Прямые измерения» в программном комплексе позволяет находить результат измерений (среднее значение измеряемой физической величины), избавляться от грубых погрешностей (промахов) и вычислять погрешность прямых измерений.

У пользователя существует возможность ввести значения элементов выборки в ячейки таблицы, изменяя, при необходимости, количество элементов выборки, а также добавить значение приборной погрешности измерений и дополнительных коэффициентов, входящих в расчетные формулы. При нестандартных размерах выборки студенты могут ввести дополнительные значения расчетных параметров.



Рис. 1 Функциональная схема программного комплекса

Для обработки данных по алгоритму прямых измерений и получения окончательного результата с учетом погрешности в округленном виде, пользователь нажимает кнопку «Вычислить».

Алгоритм статистической обработки результатов прямых измерений представлен на рисунке 2.

Исходя из представленного алгоритма на экране отображается последовательность действий, а в графе «Значение» выдается результат вычисления – среднее значение измеренной величины с учетом погрешности, записанные согласно правилам округления.

На рисунке 3 приведен скриншот экрана, иллюстрирующий работу программного комплекса по алгоритму прямых измерений. В представленном примере задавались выборка из пяти элементов и приборная погрешность 0,05.



Рис. 2. Алгоритм вычисления погрешностей прямых измерений

Для вычисления погрешностей косвенных измерений по обобщенному методу полного дифференциала функции в программном комплексе предусмотрен ввод пользователем необходимой формулы, которая оптимизируется следующим образом:

- происходит объединение операций умножения и деления, а также сложения и вычитания в единое действие;
- унарные операторы убираются или перемещаются за пределы операции возведения в степень или умножения;
- осуществляется сверка констант (подвыражения, не содержащие переменных, рассчитываются автоматически).

Выборка

Элемент x_1	Элемент x_2	Элемент x_3	Элемент x_4	Элемент x_5
0.4	0.3	0.5	-0.3	10.4

Добавить Добавить строку Очистить

Приборная погрешность σ_p 0.05

Дополнительные значения $\sigma_{p,1}$

Дополнительные значения $\sigma_{p,2}$

Вычислить

Расчет

Устранение грубых погрешностей

Найден грубый промах слева: $x_1 - x_2 = 10.688 > n \cdot R = 0.56 \cdot 10.6 = 5.936$

Найден грубый промах справа: $x_2 - x_3 = 9.676 > n \cdot R = 0.56 \cdot 10.6 = 5.936$

Грубых промахов больше нет, выборка очищена?

Значение 0.40 ± 0.25

Рис. 3. Иллюстрация работы инструмента «Прямые измерения»

После оптимизации пользователю автоматически выдается набор переменных, используемых в преобразованной формуле и предоставляется возможность ввода данных для дальнейших расчетов. Если в результате преобразований какая-либо из переменных, используемых в первоначальной формуле, пропадает, то на экране она уже не отображается. В этом случае погрешность косвенных измерений рассчитывается согласно следующему алгоритму:

- для каждой переменной находится и преобразуется формула частной производной;
- для каждой выборки набора переменных рассчитывается погрешность косвенных измерений по формуле $\overline{\Delta F} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} |_{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots} * \overline{\Delta x}\right)^2 + \dots}$, а затем в оптимизированное выражение подставляются значения из выборки;
- вычисляются среднее выборочное значение искомой величины и полная погрешность измерений.

Применение алгоритма совместных измерений в программном комплексе позволяет: вводить данные, изменять количество пар точек – добавляя дополнительные элементы; выбирать режим аппроксимации; выводить на экран аппроксимированный график функции и сами результаты аппроксимации.

Программой предусмотрено автоматическое изменение графика при вводе новых исходных данных. На рисунке 4 приведен пример линейной аппроксимации при совместных измерениях.

Оценить качество аппроксимации позволяет коэффициент детерминации R^2 , который позволяет определить наилучшее совпадение модели с данными. Этот коэффициент находится в интервале $[0,1]$, где единице соответствует идеальное совпадение.

При обработке результатов совместных измерений программный комплекс позволяет выбрать и автоматический режим. При этом выполняется алгоритм обработки данных по каждому виду аппроксимации функции, вычисляется коэффициент детерминации, и программа сама выбирает наиболее близкий вид аппроксимирующей кривой.

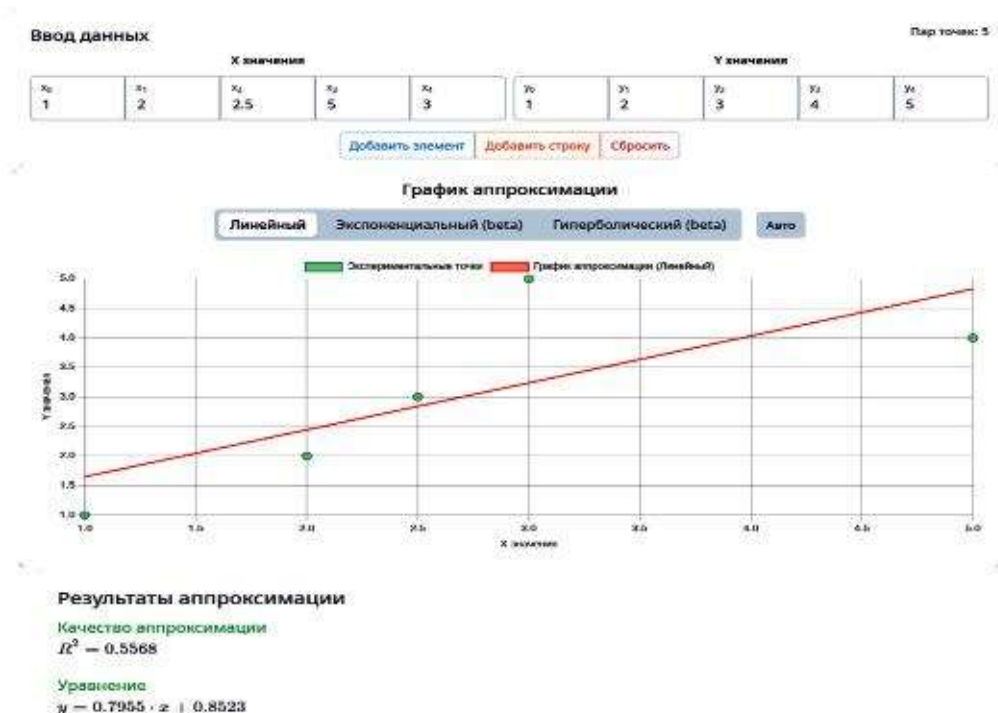


Рис. 4. Инструмент «Совместные измерения» (линейная аппроксимация)

Разработанный авторами программный комплекс может быть использован при обработке экспериментальных данных физического эксперимента, будет полезен студентам младших курсов технических вузов в лабораторном физическом практикуме, и на практических занятиях по другим дисциплинам, требующим математической обработки результатов измерений.

В дальнейшем планируется дополнить инструмент «Совместные измерения» аппроксимацией квадратичной функции; разработать сопроводительную документацию и методические рекомендации при работе с данным программным комплексом, а также разместить реализованный программный продукт на сайте кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ» для его дальнейшего массового использования в учебном процессе.

Список литературы

1. Белоногов А.М. Пособие по обработке результатов эксперимента. Учебное пособие. Ленинград: Изд-во ЛЭТИ, 1977. 64 с.
2. Vue.js. Документация [Электронный ресурс] // Vue.js. – URL: <https://vuejs.org/> (дата обращения: 05.04.2026).
3. Decimal.js [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/MikeMcl/decimal.js> (дата обращения: 05.04.2026).
4. MathLive. Документация [Электронный ресурс]. – URL: <https://mathlive.io/> (дата обращения: 06.04.2026).

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.С. БУЗОВКИН, А.А. РЫБИНА, П.Ф. САМСЫГИН, Р.С. КРЮКОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ

им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. В работе исследуется потенциал применения композитных материалов на базе графитоподобного нитрида углерода, дисульфида молибдена и графена в области газового анализа выдыхаемого воздуха. В качестве метода исследования выбрана импедансная спектроскопия. Данная технология рассматривается как ключевой инструмент для медицинской диагностики и контроля состояния пациентов.

Ключевые слова: Двумерные структуры, газовые сенсоры, нитрид углерода, дисульфид молибдена

Графитоподобный нитрид углерода $g-C_3N_4$ [1] и дисульфид молибдена MoS_2 [2] являются перспективными материалами для газовой сенсорики. Их электрофизические параметры напрямую зависят от количества слоев в полученной структуре. Традиционная механическая эксфолиация не обеспечивает должной стабильности характеристик от образца к образцу, поэтому в работе были использованы химические методы синтеза MoS_2 и $g-C_3N_4$ [3].

Синтез активного слоя дисульфида молибдена осуществлялся гидротермальным методом из водного раствора молибдата натрия, щавелевой кислоты и тиомочевина. Реакционную смесь выдерживали в автоклаве при температуре $200^\circ C$ в течение 14 часов. Формирование чувствительного слоя на электродной подложке выполнялось методом центрифугирования [4].

Для синтеза $g-C_3N_4$ использовали термическую поликонденсацию мочевины в муфельной печи при $550^\circ C$ в течение 4 часов. Порошок $g-C_3N_4$ диспергировали в воде с

помощью ультразвуковой обработки в течение 1 часа для достижения частичного расслоения и получения стабильной коллоидной суспензии. Термическая обработка при 450 °C в течение 30 мин обеспечила хорошую адгезию и структурную целостность [5].

Получены композитные структуры графитоподобного нитрида углерода и графена (Gr). Для синтеза была подготовлена суспензия компонентов в воде с соотношением массовых долей $g-C_3N_4:Gr=1:2$, из которой с помощью центрифугирования формировали газочувствительные слои. Завершающим этапом синтеза был отжиг при 200°C в течение 2 часов [6].

Морфология синтезированных газочувствительных слоев была исследована с помощью атомно-силовой микроскопии. Для оценки газочувствительных характеристик применялась импедансная спектроскопия в частотном диапазоне от 100 Гц до 500 кГц (амплитуда переменного сигнала — 255 мВ). В качестве целевого газа использовались пары изопропилового спирта. Эксперимент проводился при комнатной температуре с предварительной 5-минутной выдержкой сенсора в газовой среде. Ввиду слабой естественной десорбции молекул спирта, восстановление базовой линии проводилось путем термического отжига при 70°C. Расчет сенсорного отклика ($S=R_{air}/R_{gas}$) проводился отдельно для вещественной и мнимой составляющих импеданса [4]. Для MoS_2 при концентрации газа-аналита 500 ppm пиковые значения отклика составили 2.6 (на 2.5 кГц) для вещественной компоненты и 5.3 (на 2 кГц) для мнимой. Дальнейшее повышение частоты приводило к снижению чувствительности. Сводные данные по дисульфиду молибдена представлены в таблице 1 и на рис. 1. Исследование $g-C_3N_4$ показало отсутствие отклика при комнатной температуре. Поэтому в работе также были получены композитные газочувствительные слои $g-C_3N_4-Gr$. Данные газочувствительности структуры $g-C_3N_4-Gr$ представлены в таблице 2.

Таблица 1

Измерения максимумов чувствительности сенсора на основе дисульфида молибдена при комнатной температуре

Концентрация, ppm	По вещественной составляющей		По мнимой составляющей	
	Отклик	Частота, кГц	Отклик	Частота, кГц
500	2,6	2,5	5,3	2
1000	4	3	8	8,8
2000	4,3	3,1	8,34	8,8

Таблица 2

Измерения максимумов чувствительности сенсора на основе структуры $g-C_3N_4-Gr$ при комнатной температуре

Концентрация, ppm	По вещественной составляющей		По мнимой составляющей	
	Отклик	Частота, кГц	Отклик	Частота, кГц
500	1,39	0,842	9,23	1
1500	1,46	1,26	4,14	0,8

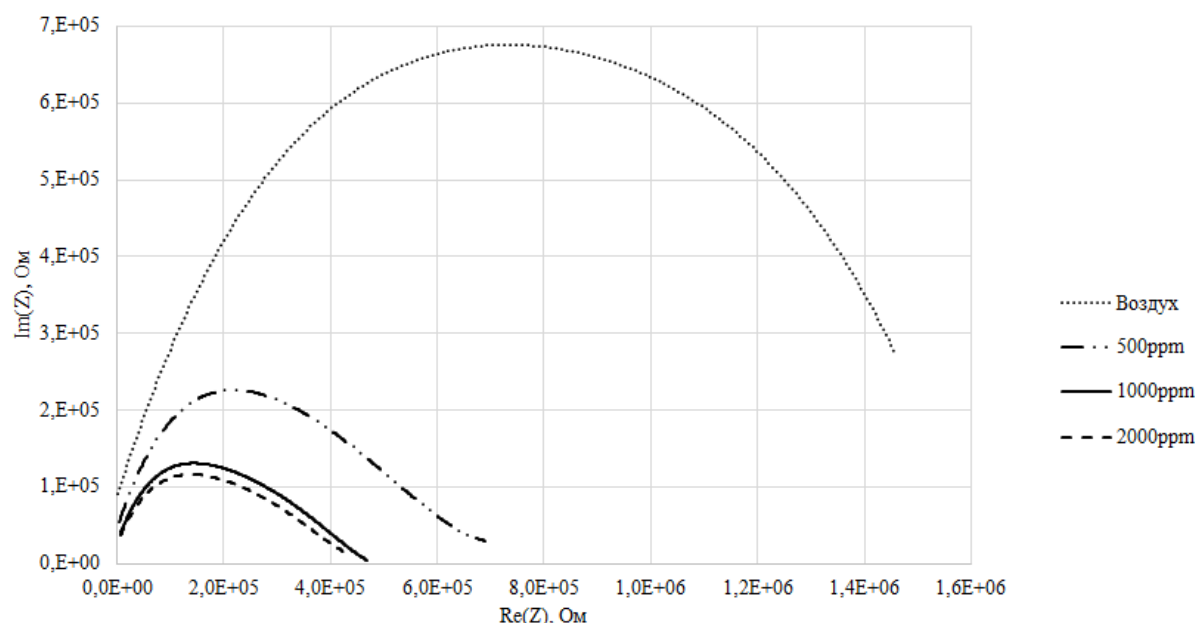


Рис. 1. Спектр импеданса MoS_2 в координатах Найквиста

В ходе проведенного исследования была подтверждена эффективность использования методов гидротермального синтеза и жидкофазного диспергирования для создания стабильных газочувствительных структур на основе дисульфида молибдена, графитоподобного нитрида углерода и композита $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Gr}$. Метод импедансной спектроскопии позволил выявить высокую чувствительность разработанных сенсоров к парам изопропилового спирта при комнатной температуре. Анализ экспериментальных данных показал, что мнимая составляющая импеданса демонстрирует значительно более высокие значения отклика по сравнению с вещественной для всех исследуемых образцов. Установлено, что для сенсоров на основе дисульфида молибдена максимальный отклик достигается на частоте 2,88 кГц, тогда как структура $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-Gr}$ проявляет пиковую чувствительность на более низких частотах, около 1 кГц. Полученные результаты открывают перспективы для создания высокоточных диагностических систем на базе двумерных полупроводниковых материалов.

Авторы выражают благодарность аспиранту кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» К.Д. Буй за предоставленные образцы $\text{g-C}_3\text{N}_4$, а также сотрудникам Центра сканирующей зондовой микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» за возможность проведения исследований морфологии газочувствительных слоев.

Список литературы

1. Буй К.Д. и др. Графитоподобный нитрид углерода: свойства и применение в газовой сенсорике. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2025. – Т. 27. № 2. – С. 177-189.
2. Öztürk H. et al. Ultra-fast detection of ethanol and humidity at room temperature by microboxes formed MoS_2 gas sensor prepared with quick double step sulfurization process // J Mater Sci: Mater Electron. – 2025. – V. 36. – P. 1911.
3. Yang J. et al. Enhancing selectivity of two-dimensional materials-based gas sensors // Advanced Functional Materials. – 2025. – V. 35. – Is. 20. – P. 2420393.
4. Налимова С.С. и др. Газочувствительные свойства наноструктур дисульфида молибдена // Неорганические материалы. – 2025. – Т. 61. № 1-2. – С. 111-117.
5. Bui C. D. et al. Alcohol Sensing Behavior and Impedance Spectroscopy Characterization of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ Nanosheets // Nanomaterials. – 2026. – V. 16. Is. 3. – P. 213.

6. Moradi R. et al. Improvement of gas-sensing performance of rGO/g-C₃N₄ nanocomposites by Ag NPs functionalization // Advanced Powder Technology. – 2023. – V. 34. Is. 10. – P. 104170.
7. Choi S. J., Kim I. D. Recent developments in 2D nanomaterials for chemiresistive-type gas sensors // Electronic Materials Letters. – 2018. – V. 14. Is. 3. – P. 221-260.

G-C₃N₄ И КОМПОЗИТЫ НА ЕГО ОСНОВЕ В ГАЗОВОЙ СЕНСОРИКЕ: ОТ 2D НАНОЛИСТОВ К 0D/1D И 2D/2D ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ

Буй К. Д., НАЛИМОВА С. С.

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

Аннотация. В работе исследованы газочувствительные свойства двумерных наноллистов графитоподобного нитрида углерода (g-C₃N₄) и гетероструктур на его основе для детектирования летучих органических соединений. Чистый 2D g-C₃N₄ демонстрирует отклик 5,3–7,6 на пары изопропанола при рабочих температурах 150–250°C. Формирование 0D/1D гетероперехода с наностержнями ZnO увеличивает коэффициент отклика до 20 при концентрации 2000 ppm и сокращает время реакции до 7 секунд при температуре 250°C. 2D/2D композит WS₂/g-C₃N₄ имеет ширину запрещенной зоны до 2,1 эВ, обеспечивая адсорбцию паров летучих органических соединений при комнатной температуре. Структурная модификация материала выступает физически обоснованным методом конструирования газовых сенсоров с низким энергопотреблением.

Ключевые слова: газовые сенсоры, графитоподобный нитрид углерода, летучие органические соединения

Введение

Контроль концентрации летучих органических соединений (ЛОС) является необходимой задачей для экологического мониторинга и обеспечения промышленной безопасности. Традиционные металлооксидные полупроводниковые сенсоры требуют высоких рабочих температур для достижения приемлемой чувствительности и скорости отклика, что приводит к высокому энергопотреблению [1].

Графитоподобный нитрид углерода (g-C₃N₄) представляет собой неметаллический полимерный полупроводник *n*-типа, структура которого состоит из слоев *sp*²-гибридизированных атомов углерода и азота, образующих гептазиновые или триазиновые кольца [2]. Межслоевые взаимодействия обеспечиваются слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Прямое использование объемного g-C₃N₄ в газовых сенсорах ограничивается его малой удельной поверхностью (обычно менее 10 м²/г) и высокой скоростью рекомбинации фотогенерируемых носителей заряда [3, 4].

Данная работа обобщает наши результаты исследований газовых свойств двумерных (2D) наноллистов g-C₃N₄, а также гетероструктур на его основе: гибридов 0D/1D с наностержнями оксидов цинка ZnO и 2D/2D композитов с дисульфидом вольфрама (WS₂).

Синтез и сенсорные свойства 2D наноллистов g-C₃N₄

Указанный материал в форме двумерных наноллистов имеет удельную площадь поверхности до 60–150 м²/г. Наноразмерная толщина данной структуры сокращает расстояния диффузии целевых молекул и миграции электронов к поверхности материала. Формирование пористых каналов между наноллистами способствует ускоренному переносу электронов, улучшает времена отклика, восстановления и повышает чувствительность сенсора [5].

Синтез 2D наноллистов $g-C_3N_4$ реализуется методом термической поликонденсации мочевины при температуре 550°C в течение 4 часов с последующей жидкофазной ультразвуковой эксфолиацией [5].

Сенсорный механизм $g-C_3N_4$ базируется на модуляции электрического сопротивления. В воздушной среде молекулы кислорода адсорбируются на поверхности наноллистов, захватывают электроны из зоны проводимости и формируют анионные формы кислорода. При контакте с парами спиртов происходит поверхностная реакция окисления, в результате которой электроны возвращаются в зону проводимости и электрическое сопротивление падает. Чистый 2D $g-C_3N_4$ демонстрирует линейный отклик 1,1–7,6 на пары этанола и изопропанола с диапазоном концентраций 1000 – 2000ppm при рабочих температурах $150\text{--}250^\circ\text{C}$. И время отклика составляет 20 с, а время восстановления равно 75 с. Скорость отклика немодифицированного материала обусловлена малой толщиной эксфолиированных наноллистов.

Формирование и сенсорные свойства 0D/1D гетероструктур $ZnO/g-C_3N_4$

Для повышения чувствительности формируются гетероструктуры на основе наностержней ZnO и квантовых точек (КТ) $g-C_3N_4$. Оксид цинка с гексагональной структурой вюрцита (ширина запрещенной зоны 3,3 эВ) обеспечивает высокую подвижность электронов и большую удельную поверхность для адсорбции газов [7, 8]. Осаждение КТ $g-C_3N_4$ размером около 10 нм на поверхность наностержней ZnO создает 0D/1D гетероструктуру. Разница в уровнях Ферми приводит к направленному движению электронов на границе раздела фаз и расширению обедненного слоя. Атомы азота в кольцах триазина/гептазина действуют как активные центры для адсорбции молекул.

Зародышевый слой наночастиц ZnO наносится на подложку методом центрифугирования, после чего массив вертикальных наностержней выращивается гидротермальным способом при температуре 85°C . КТ $g-C_3N_4$ синтезируются путем гидротермальной обработки объемного нитрида углерода при температуре 180°C . Гетероструктура $ZnO/g-C_3N_4$ формируется методом самопроизвольного осаждения при погружении подложки с наностержнями в суспензию квантовых точек.

Оптимальная рабочая температура для гибридных структур $ZnO/g-C_3N_4$ составляет 250°C . При воздействии 2000 ppm изопропанола композит демонстрирует коэффициент отклика около 20, что в 8 раз превышает показатели сенсора на основе наностержней ZnO . время отклика сокращает на 500 ppm изопропанола с 34 до 7 с, а время восстановления с 68 до 14 с по сравнению с массивом чистых наностержней ZnO . Повышение эффективности объясняется синергией гетероперехода типа II, ускоренным разделением носителей заряда и снижением потенциального барьера в процессе окислительно-восстановительной реакции между ЛОС и адсорбированным кислородом.

2D/2D нанокомпозиты $WS_2/g-C_3N_4$ для детектирования ЛОС при комнатной температуре

Необходимость разработки газочувствительных материалов, функционирующих при комнатной температуре, обусловлена ограничениями традиционных сенсоров. Дихалькогениды переходных металлов обладают слоистой структурой, активными краевыми состояниями и функционированием без дополнительного нагрева [9].

Для получения этого композита применяется метод одностадийного прокаливании смеси прекурсоров ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ и CH_4N_2S) при 550°C . Внедрение WS_2 в матрицу $g-C_3N_4$ снижает ширину запрещенной зоны с 2,7 эВ до 2,1 эВ.

Газочувствительные свойства композита $WS_2/g-C_3N_4$ были исследованы при комнатной температуре. Материал демонстрирует слабый отклик на пары этанола, изопропанола и ацетона. Максимальное изменение сопротивления образца составляет 5% (от 770 МОм до 740 МОм) при воздействии паров ацетона. Достоинство данного решения заключается в отсутствии необходимости термической активации, что снижает энергопотребление сенсорного устройства.

В таблице 1 показаны газочувствительные параметры материала $g-C_3N_4$ и его композитов для детектирования паров ЛОС.

Таблица 1

Газочувствительные параметры материалов

Материал	Целевой газ	Концентрация, ppm	Рабочая температура, °C	Отклик	Время отклика / восстановления, с
2D $g-C_3N_4$	Изопропанол	1000–2000	150–250	5,3–7,6 (Ra/Rg)	20/75
ZnO/ $g-C_3N_4$	Изопропанол	500–2000	150–250	8,2–20 (Ra/Rg)	7/14
$WS_2/g-C_3N_4$	Ацетон	1000	Комнатная температура	5% (изменение сопротивления)	5/7

Заключение

Результаты исследований показывают, что структурная модификация графитоподобного нитрида углерода и конструирование гетеропереходов являются эффективными путями для создания высокочувствительных сенсоров ЛОС. Переход от объемной структуры к 2D нанолитам обеспечивает увеличение плотности поверхностных реакционных центров. Интеграция 0D КТ $g-C_3N_4$ с 1D наностержнями ZnO формирует гетеропереходы типа II, которые усиливают отклик на изопропанол за счет электрокаталитического эффекта. Формирование 2D/2D гетероструктур с WS_2 уменьшает ширину запрещенной зоны до 2,1 эВ и обеспечивает работу сенсора при комнатной температуре. Разработанные композиты представляют практический интерес для создания газовых сенсоров с низким энергопотреблением.

Список литературы

1. Большаков А. Д., Кондратьев В. М., Мошников В. А., Налимова С. С. Наноматериалы. Нитевидные нанокристаллы: синтез и характеристика: учебное пособие / под ред. В. А. Мошникова. — Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2023. — 83 с. — ISBN 978-5-7629-3219-6.
2. Zhao Y., Wang T., Li X. [et al.]. Recent advance and perspectives in $g-C_3N_4$ based gas sensing materials: a review // Sensors and Actuators A: Physical. 2023. Vol. 355. P. 114313.
3. Bhati V.S., Raliya R., Takhar V. [et al.]. Recent advances in $g-C_3N_4$ based gas sensors for the detection of toxic and flammable gases: A review // Nano Express. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 014003.
4. Буй К.Д., Налимова С.С., Мошников В.А. [и др.]. Подходы к синтезу $g-C_3N_4$ для межфазного молекулярного дизайна в перовскитных солнечных элементах // Нано- и микросистемная техника. 2024. Т. 26. № 3. С. 136-144.
5. Sahani Sh., Park S.Ju., Myung Yu. [et al.]. Enhanced room-temperature ethanol detection by quasi 2D nanosheets of an exfoliated polymeric graphitized carbon nitride composite-based patterned sensor // ACS Omega. 2022. Vol. 7, No. 46. P. 41905-41914.
6. Bui C.D., Nalimova S., Kondratev V. [et al.]. Alcohol Sensing Behavior and Impedance Spectroscopy Characterization of $g-C_3N_4$ Nanosheets // Nanomaterials. 2026. Vol. 16. P. 213.
7. Буй К.Д., Налимова С.С., Шомахов З.В. [и др.]. Покрyтия из наностержней гетероструктуры ZnO/ Zn_2SnO_4 для эффективного детектирования ацетона // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2024. Вып. 16. С. 794-804.

8. Рябко А.А., Бобков А.А., Налимова С.С., Максимов А.И. [и др.]. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 758-764.

9. Шомахов З.В., Налимова С.С., Зырянова О.Д., Кондратьев В.М., Калажоков З.Х., Буй К.Д., Мошников В.А. Газочувствительность нанокомпозитов WO_x/WS_2 при комнатной температуре и ультрафиолетовом облучении // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2024. Вып. 16. С. 1060-1070.

РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ

ВАЛЬШИНА Р., СИТКОВ Н.О.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. В работе представлена разработка миниатюрного портативного устройства для проведения электрохимических измерений, ориентированного на применение в составе биосенсорных систем. Устройство реализует режимы измерений на основе циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии и предназначено для работы с электрохимическими электродами. Разработана электронная схема устройства, программное обеспечение управления и интерфейс визуализации результатов измерений. Проведено экспериментальное тестирование устройства с стандартизированными электрохимическими электродами и выполнено сравнение полученных данных с результатами измерений с помощью лабораторного потенциостата. Показано, что разработанная система обеспечивает корректную регистрацию электрохимического отклика и может применяться в переносных диагностических устройствах.

Ключевые слова: потенциостат, биосенсор, циклическая вольтамперометрия, хроноамперометрия, печатный электрод.

Введение

Электрохимические методы анализа широко используются в медицине, фармацевтике, экологическом мониторинге и пищевой промышленности. Их важным преимуществом являются высокая чувствительность, сравнительно простая аппаратная реализация и возможность миниатюризации измерительных систем. Благодаря этим особенностям электрохимические методы активно применяются при создании биосенсоров для определения биологически значимых веществ.

Одним из ключевых элементов электрохимических аналитических систем является потенциостат – устройство, обеспечивающее поддержание заданного потенциала на электродной системе и регистрацию возникающего токового сигнала. Традиционные лабораторные потенциостаты обладают высокой точностью, однако отличаются высокой стоимостью, крупными размерами и ограниченной мобильностью.

В настоящее время особый интерес представляет разработка компактных и доступных потенциостатов, способных работать совместно с одноразовыми печатными электродами. Печатные электроды обладают низкой себестоимостью, технологичностью изготовления и перспективны для массового применения в экспресс-диагностике.

Целью работы являлась разработка миниатюрного устройства для электрохимических биосенсорных измерений и экспериментальная оценка его характеристик при работе с печатным электродом.

Разработка устройства

В рамках работы было создано портативное устройство, реализующее функции потенциостата для трехэлектродной электрохимической ячейки. Конструкция включает следующие основные узлы (рис.1): узел формирования опорного напряжения, ЦАП для формирования потенциала, буферный усилитель, потенциостатический узел, трансимпедансный усилитель, АЦП для регистрации сигнала, микроконтроллерный блок управления, программный интерфейс персонального компьютера.

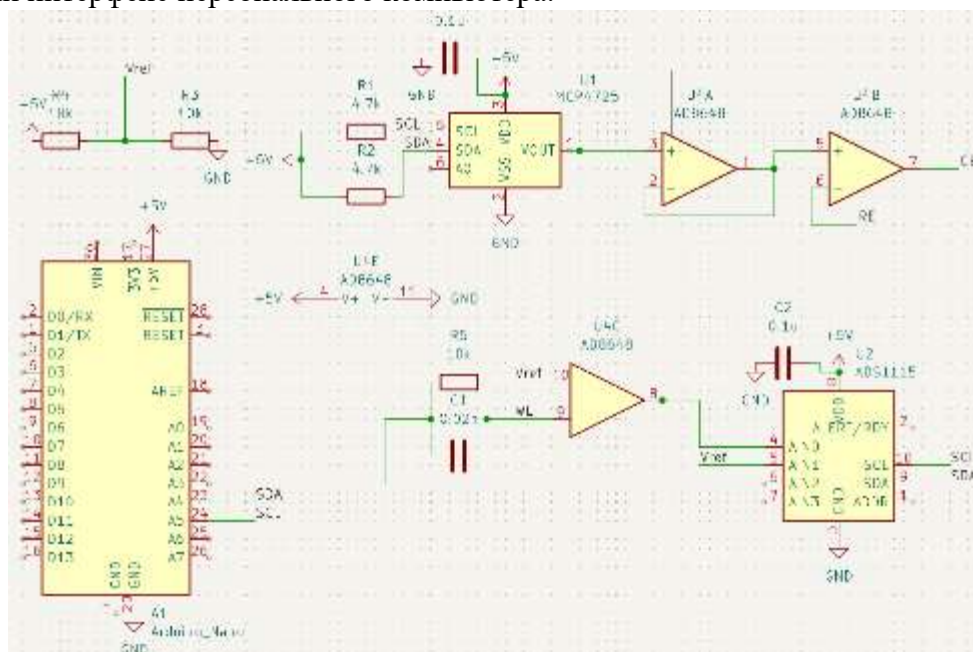


Рис. 1. Электрическая схема разрабатываемого устройства

Принцип работы устройства основан на поддержании заданного потенциала между рабочим и электродом сравнения при одновременной регистрации тока, протекающего через рабочий электрод. Полученный токовый сигнал преобразуется в напряжение, оцифровывается и передается в программное обеспечение для отображения и дальнейшей обработки.

Для повышения удобства эксплуатации был разработан пользовательский интерфейс, позволяющий задавать параметры эксперимента, выбирать режим измерения и сохранять результаты в файл.

Использование современной элементной базы позволило снизить габариты устройства и обеспечить возможность автономного применения вне лабораторных условий.

Тестирование разработанного устройства

Испытания разработанного устройства проводились с использованием печатного трехэлектродного сенсора. Для оценки работоспособности применялись методы циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии.

Циклическая вольтамперометрия проводилась при скоростях развертки: 10 мВ/с, 20 мВ/с, 50 мВ/с, 100 мВ/с, 200 мВ/с. Хроноамперометрические измерения выполнялись при фиксированных потенциалах: 10 мВ, 50 мВ, 100 мВ, 200 мВ, 500 мВ.

Для проверки достоверности измерений аналогичные эксперименты были проведены на лабораторном потенциостате. Это позволило выполнить сравнительный анализ характеристик разработанного прибора и эталонной измерительной системы.

Результаты и обсуждение

В ходе испытаний устройство продемонстрировало устойчивую работу во всех исследуемых режимах. Полученные циклические вольтамперограммы имели характерную петлеобразную форму с выраженными участками анодного и катодного отклика, соответствующими типичным электрохимическим процессам на поверхности рабочего электрода.

При увеличении скорости развертки наблюдался рост амплитуды регистрируемого тока, что согласуется с теоретическими представлениями о кинетике электрохимических процессов. Полученные зависимости подтверждают достаточно корректную работу схемы формирования потенциала и измерительного тракта устройства.

В режиме хроноамперометрии зафиксировано характерное уменьшение тока во времени после подачи потенциала. Такая форма сигнала соответствует диффузионному механизму массопереноса электроактивных компонентов к поверхности электрода.

Сравнение с лабораторным потенциостатом показало хорошее совпадение формы экспериментальных кривых и общей динамики сигнала. При этом лабораторная установка обеспечивала несколько меньший уровень шумов и более высокую точность измерения малых токов. Однако разработанное устройство продемонстрировало достаточную стабильность и воспроизводимость результатов.

Полученные данные свидетельствуют о возможности применения созданного прибора совместно с печатными электродами в составе переносных биосенсорных систем.

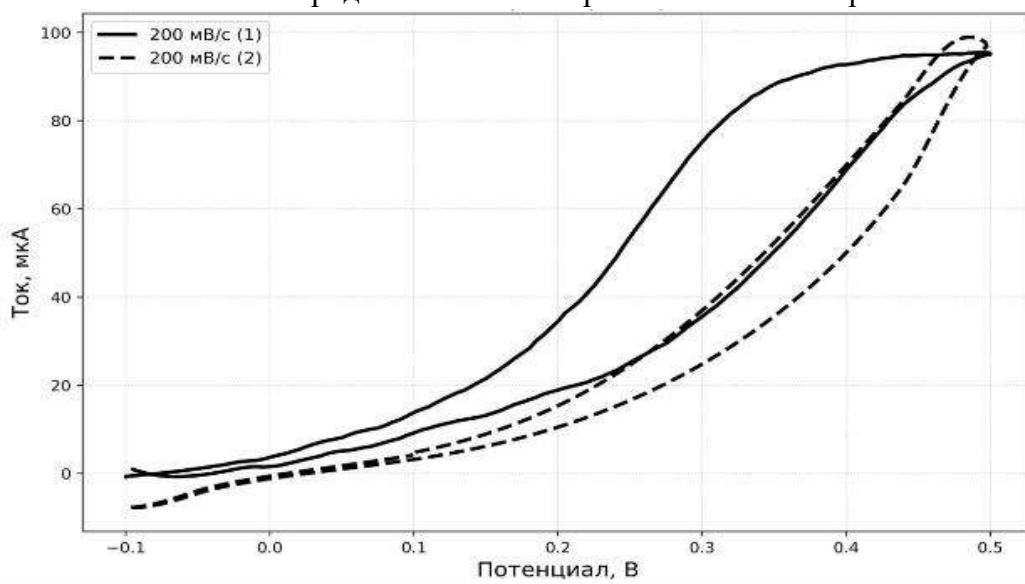


Рис. 2. Циклическая вольтамперограмма при 200 мВ/с, 1 – разработанное устройство, 2 – коммерческий потенциостат

Заключение

Разработано миниатюрное устройство для электрохимических биосенсорных измерений, реализующее методы циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии. Экспериментально подтверждена работоспособность прибора при использовании печатного электрода.

Сравнение результатов с коммерческим устройством показало сопоставимость формы регистрируемых сигналов и корректность измерений. Разработанное устройство может

рассматриваться как перспективная основа для создания недорогих переносных биосенсоров и систем экспресс-анализа.

Дальнейшее развитие работы связано с уменьшением шумов измерительного тракта, повышением чувствительности и адаптацией прибора для регистрации биомаркеров в реальных образцах.

Список литературы

1. Abdul Ghani M.A., Nordin A.N., Zulhairee M., Che Mohamad Nor A., Shihabuddin Ahmad Noorden M., Muhammad Atan M.K.F., Ab Rahim R., Mohd Zain Z. Portable electrochemical biosensors based on microcontrollers for detection of viruses: a review // *Biosensors*. – 2022. – Vol. 12, № 8. – P. 666.
2. Ronkainen N.J., Halsall H.B., Heineman W.R. Electrochemical biosensors // *Chemical Society Reviews*. – 2010. – Vol. 39, № 5. – P. 1747–1763.
3. von Zuben T.W., Salles A.G. Jr., Bonacin J.A. Low-cost open-source potentiostats: a comprehensive review of DIY solutions and fundamental concepts of electronics and its integration with electrochemistry // *Journal of Chemical Education*. – 2023. – Vol. 100. – P. 1–15.

РАЗРАБОТКА СТЕНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЗАСЛОНКАМИ МОДУЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА

ВАСИЛЬЕВ Н.С.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Данная работа рассматривает процесс разработки стендового оборудования для блока управления заслонками, входящего в состав модуля обеспечения температурно-влажностного режима. В статье представлены результаты разработки блок-схемы стенда и электрической схемы приспособления для проверки блока управления заслонками, а также смоделирован процесс проверки. Актуальность работы обусловлена необходимостью проверки элементов военной техники для их безотказной службы, что является острым моментом в текущей обстановке.

Ключевые слова: стендовое оборудование, приспособление для проверки, интерфейс CAN, блок-схема стенда, блок управления заслонками.

В составе модуля обеспечения температурно-влажностного режима (МОТВР) предусмотрены два независимых воздушных канала, обеспечивающих подвод воздуха в транспортно-пусковые контейнеры, в которых хранятся ракеты. Каждый канал оснащён основным и резервным агрегатами поддержания температурно-влажностного режима, электромеханизмами с установленными на них заслонками, датчиками положения заслонок, двумя блоками управления заслонками.

В составе МОТВР реализована распределённая система управления, в которой участвует несколько «умных» блоков, наиболее важные из которых: блок управления, блок коммутации и блок управления заслонками. Эти блоки выполнены в едином конструктивном исполнении и передают информацию между собой с помощью интерфейса CAN.

Физически шина CAN представляет собой два провода, образующих витую пару, которые обозначаются как CAN_H (CAN High) и CAN_L (CAN Low). В работе шины различают два логических состояния: доминантное, соответствующее логическому нулю ($U_{CAN_H} = 3,5 \text{ В}$ и $U_{CAN_L} = 1,5 \text{ В}$), и рецессивное, соответствующее логической единице ($U_{CAN_H} = U_{CAN_L} = 1,5 \text{ В}$). Для согласования линии и предотвращения отражения сигнала

на концах физической шины обязательно устанавливаются резисторы номиналом 120 Ом, которые называются терминаторами.

Передача данных по CAN шине осуществляется дифференциальным способом: полезный сигнал кодируется разностью напряжений между двумя проводами. Вследствие этого CAN обладает высокой помехоустойчивостью, так как если внешняя электромагнитная помеха воздействует на оба провода синфазно, то разность напряжений между CAN_H и CAN_L практически не изменяется, и информация не искажается. Этот фактор является главным плюсом этого интерфейса в контексте использования в военной технике, которая сталкивается с постоянным влиянием излучения от РЛС и радиостанций.

Блок управления заслонками это герметичная коробка с соединителями и индикационными элементами, включающая в себя плату контроллера CAN и плату ввода-вывода. Основным предназначением является контроль и изменение положения заслонок в воздуховодах. Внешний вид блока представлен на рис. 1.

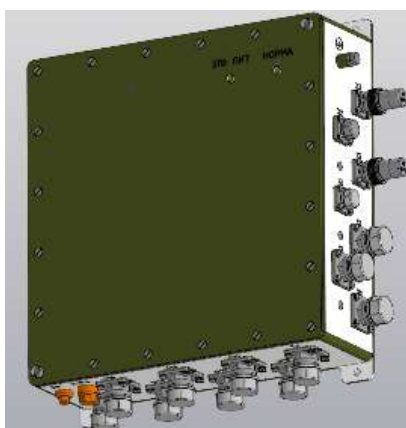


Рис. 1. Внешний вид блока управления заслонками

Блок-схема разрабатываемого стенда для блока управления заслонками представлена на рис. 2.

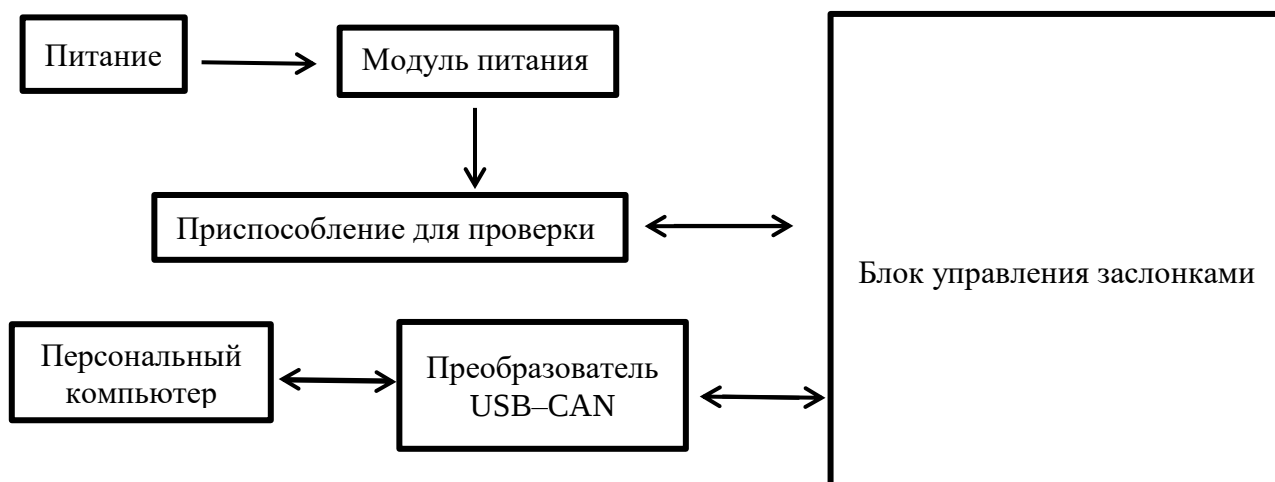


Рис. 2. Блок-схема стенда для блока управления заслонками

В качестве модуля питания используется МДМ7,5-2В0505МУП, преобразующий питание от бортовой сети машины +27 В в напряжение +5 В, необходимое для питания всех компонентов блока.

Преобразователь интерфейса USB–CAN EL205-1 это прибор отечественного производства, являющийся бюджетным средством связи компьютера с проверяемым блоком для передачи информации и обладающий отличной пропускной способностью.

Персональный компьютер является командным центром всей проверки. Главным требованием является наличие оперативной системы не ниже Windows XP для безошибочной работы программы проверки и наличие свободного COM-порта (USB). Персональный компьютер можно заменить ноутбуком для обеспечения портативности стенда.

Приспособление для проверки было разработано согласно конструктивным особенностям блока. Принципиальная электрическая схема приспособления представлена на рис. 3.

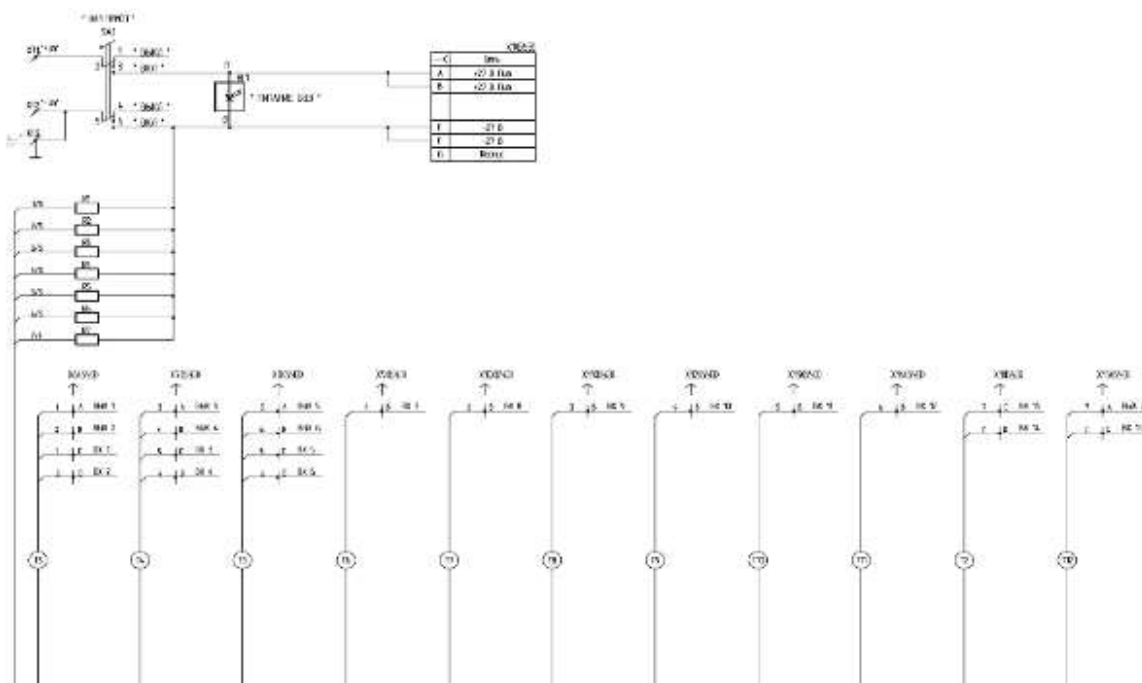


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема приспособления для проверки

Приспособление подпитывается от источника питания, подающего положительное и отрицательное напряжения номиналом 27 В. Для подачи и отключения питания используется тумблер SA1, о наличии/отсутствии питания приспособления свидетельствует состояние индикационного светодиода HL1, который загорается при подаче напряжения через приспособление. Резисторы подтяжки R2-R8 – резисторы подтяжки, необходимые для создания дискретных уровней «лог. 0» и «лог. 1». X1(БУЗ) – вилка, с помощью которой происходит подключение приспособления к проверяемому блоку. Технологические кабели соединяют входы и выходы блока с приспособлением для проверки.

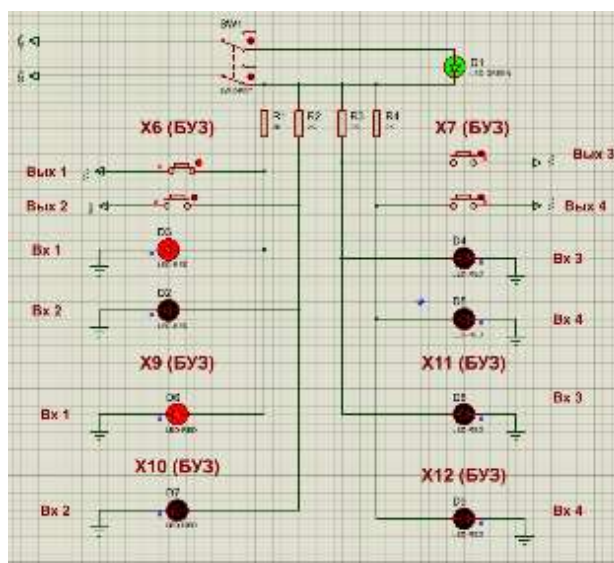


Рис. 5. Моделирование проверки входов 1 и 7 и выхода 1

Суть проверки заключается в поочередной подаче сигналов на выходы блока с целью увидеть этот же сигнал на двух соответствующих ему входах. Очередность проверки определяется принципом работы блока и отображена на принципиальной электрической схеме в качестве определенного подключения дискретных входов и выходов к определенным резисторам подтяжки и их нумерацией.

Моделирование проверки приведено на рис. 5.

Следующим шагом проверки является проверка работоспособности интерфейса CAN. Для этого требуется подключить осциллограф к проводам витой пары и запустить программу проверки. После этого начинает идти сигнал, который можно наблюдать на осциллограмме, отмечая при этом постоянную смену состояний с разной периодичностью. Осциллограмма результата проверки приведена на рис.6.

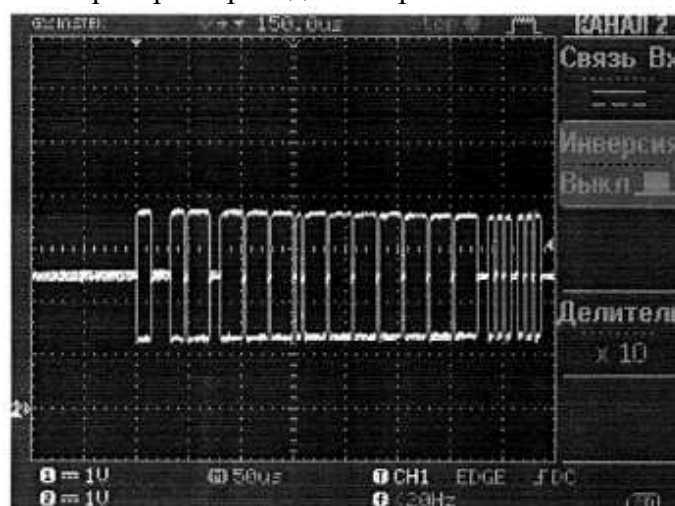


Рис. 6. Осциллограмма CAN-шины

Результатом проведенной работы является разработанный стенд для блока управления заслонками, соответствующий техническому заданию проверки работоспособности. Данный стенд осуществляет процесс проверки дискретных входов и выходов блока управления заслонками, а также проводит проверку работоспособности интерфейса CAN

Список литературы

1. Кобзев А.А., Мишулин Ю.Е. Бортовые сети транспортных средств.
2. Головолобов В.Н. Радиоэлектроника. От азов до создания практических устройств.
3. Павлов В.Е. Основы испытаний продукции.
4. Смирнов. Ю.А. Электронные и микропроцессорные системы управления автомобилем.

ТОНКИЕ ПЛЁНКИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА САМАРИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Видлацкий А.

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

Аннотация. Проведены исследования на тонкоплёночных образцах сульфида самария с заданным градиентом примеси Sm. Показано, что тонкие плёнки обладают большим потенциалом для преобразования тепловой энергии в электрическую. Выходной сигнал с одной из таких тонкоплёночных структур показал... Применение тонких плёнок на основе РЗП в электронике возможно в качестве источников питания маломощных элементов.

Ключевые слова: редкие земли, переменная валентность, термовольтаический эффект

Редкоземельными полупроводниками (РЗП) принято называть соединения, в состав которых входит редкоземельный ион с незаполненной 4f-внутренней оболочкой. Эта оболочка постепенно заполняется от La до Lu. f-уровни располагаются глубоко в атоме и экранированы от внешних возбуждений 5s²p⁶-электронами. При образовании РЗП 4f-оболочки не перекрываются друг с другом (радиус 4f-оболочки ~0,3Å, что в среднем составляет 0,1 межатомного расстояния), а образуют локализованные уровни с концентрацией $\approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и обычно ведут себя подобно атомным: обладают такими же свойствами и характеризуются теми же квантовыми числами L, S, J, что и состояния соответствующего изолированного иона. Однако, от этого правила несколько отклоняются соединения с промежуточной (переменной) валентностью (ПВ). В ряду лантаноидов существует пять элементов, обладающие переменной валентностью: Ce, Eu, Sm, Tm и Yb. В образованных с этими элементами соединениях близкими по энергии оказываются состояния с различным числом электронов на центре (например, 4fⁿ и 4fⁿ⁻¹+e⁻; e⁻ – электрон в зоне проводимости). Такое явление придаёт соединениям с ПВ правом обладать набором уникальных физических свойств, присущих только этому классу материалов.

Среди соединений с ПВ наиболее интересным является моносульфид самария (SmS). Отличительной особенностью полупроводникового SmS является наличие в нём широкой области гомогенности, в пределах которой физические свойства материала изменяются от полупроводниковых до полуметаллических. Область гомогенности SmS простирается примерно от 50 до 54 ат.% Sm и не распространяется в сторону избытка серы, т.е. SmS представляет собой одностороннюю непердельную фазу переменного состава. Интерес к исследованию SmS обусловлен уникальными свойствами данного материала. Одним из таких свойств является наличие изоструктурного фазового перехода I рода «полупроводник-металл» при небольшой величине гидростатического сжатия – 0,65 ГПа. Одним из интересных явлений, сопровождающий фазовый переход, является то, что ион Sm

в металлической фазе обладает нецелочисленной валентностью. То есть мы имеем изменение валентности $\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+} + e^-$. Именно благодаря такому явлению в SmS и были проявлены его выдающиеся результаты.

Рекордные значения коэффициента пьезосопротивления (до $6 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$), что позволило применить SmS как тензочувствительный материал в датчиках механических величин.

В монокристаллах SmS и соединениях на их основе был обнаружен большой по величине изотропный тензорезистивный эффект [1]. Максимальная величина коэффициента тензочувствительности составила 260. По своей тензочувствительности материалы на основе SmS превосходят большинство других полупроводниковых материалов, применяемых в настоящее время в тензометрии, что делает перспективным использование монокристаллов и тонких поликристаллических плёнок SmS в качестве материала для чувствительных элементов датчиков давления и тензорезисторов. А высокая радиационная стойкость SmS [2] расширяет область применения этих материалов.

В 1999 году в SmS был обнаружен новый эффект, названный впоследствии термо voltaическим (ТВЭ) [3]. Суть эффекта заключается в генерации образцом SmS ЭДС при нагревании не за счёт заданного градиента температур, а за счёт градиента концентрации электронов в зоне проводимости. Градиент в SmS задаётся тем, что одна из сторон образца имеет большее содержания Sm, чем другая. Исследования показали, что КПД преобразования тепловой энергии в электрическую составило до 36% в диапазоне температур 300–500K. С целью увеличения рабочего диапазона были исследованы твёрдые растворы $\text{Sm}_{1-x}\text{Ln}_x\text{S}$ (где Ln = Eu, Gd, Yb) [4].

С другой стороны, стремление мирового сообщества к переходу к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике ставит перед мировым сообществом новые задачи. ТВЭ, как один из принципов преобразования тепловой энергии в электрическую, может стать одним из тех решений, который способен осуществить данный переход. Надо отметить, что ТВЭ был обнаружен не только в РЗП, но и в других полупроводниках: ZnO, Ge, Si, PbTe и различных полупроводниках сложного состава [5, 6, 7]. Однако величина выходного сигнала в них слишком мала.

Плёнки моносulfида самария напылялись методом взрывного испарения в вакууме на подложку. Напыление происходило последовательно сперва слой SmS, затем слой $\text{Sm}_{1.06}\text{S}$ (что представляет собой SmS с избытком Sm 51,5%). Таким образом задавался градиент концентрации примеси, необходимый для активации ТВЭ. Толщины слоёв (плёнок) составили ~0,1 мкм. Подложка представляет собой поликоровую пластину (на основе Al_2O_3) с ровной плоской поверхностью с нанесённым слоем металла. Данный слой является «нижним» контактом. «Верхний» контакт был прижимного типа.

Схема измерения показана (рис.1). Сигнал снимался с использованием аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и выводился на экран монитора. На (рис.2) представлен спектр выходного сигнала со структур $\text{SmS}/\text{Sm}_{1.06}\text{S}$.

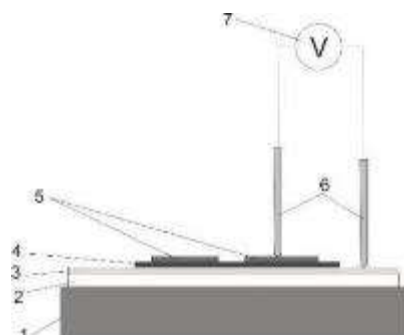


Рис. 1. Схема коммутации одиночной структуры.

1 – Нагреватель; 2 – подложка; 3 – металлический слой («нижний» контакт); 4 – плёнка $Sm_{1.06}S$; 5 – плёнка SmS ; 6 – токовыводы; 7 – измерительный прибор (АЦП).

Согласно схеме эксперимента (рис.1) сперва должен происходить равномерный нагрев нижнего слоя плёночной структуры и затем верхнего. Но ввиду малой толщины плёнок можно уверенно сказать, что оба слоя имеют одинаковую температуру. Исходя из формулы [8]:

$$U = \frac{k(T - T_0)}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

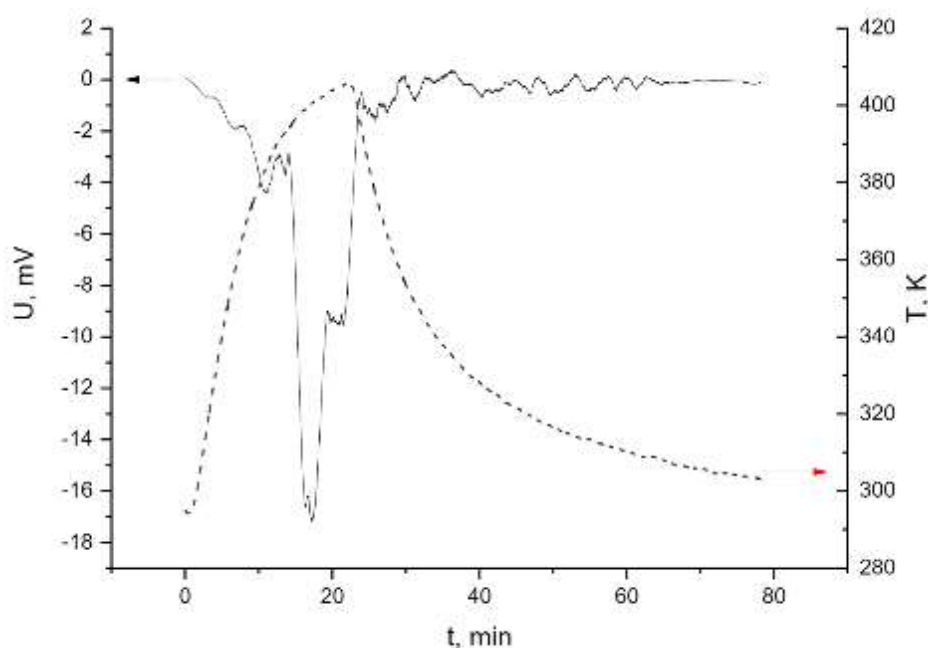


Рис. 2. Спектр генерации выходного сигнала структуры $SmS/Sm_{1.06}S$ – сплошная; пунктир – температура подложки

Можно провести оценочный расчёт выходного сигнала, подставляя известные из литературы данные:

Таблица 1

Соединение	$n, \text{см}^{-3}$
SmS	$6 \cdot 10^{18}$
Sm _{1.06} S	$1.4 \cdot 10^{20}$

В результате мы получим, что выходной сигнал должен составить 30 мВ, что в полтора раза больше, чем получено во время эксперимента. Нужно признать, что данная формула верна для объёмных поликристаллических образцов и для плёнок применена впервые. Результаты говорят, что необходимо дальнейшее изучение тонкоплёночных структур.

Основные выводы работы. Тонкоплёночные структуры подходят для электроники в качестве источников питания для маломощных элементов. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения теории термовольтаического эффекта в тонких плёнках.

Список литературы

1. Каминский В.В., Гребинский С.И., Романова М.В., Гончарова Е.В., Голубков А.В., Смирнов. И.А. Тензорезистивный эффект в SmS и возможности его практического применения. // VII Всес.сем. по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации. Тез.докл., АН СССР, М., 1981, с.104-105
2. В.В.Каминский, Л.Н.Васильев, Е.Д.Горнушкина, С.М.Соловьёв, Г.А.Сосова, Н.М.Володин. Влияние гамма облучения на электрические параметры тонких плёнок SmS. – ФТП, 1995, т.29, в.2, с.306-308.
3. М.М.Казанин, В.В.Каминский, С.М.Соловьёв. Аномальная термоэдс в моносulfиде самария. ЖТФ, 2000, т.70, в.5, с.136-138.
4. Kazakov S.A., Grevtsev M.A., Khavrov G.D., Solov`ev S.M., Sharenkova N.V., Kazanin M.M., Kaminskii V.V. Calculation of self-consistent electrophysical parameters of semiconductor gas sensors based on samarium sulfide for semiconductor Fourier spectroscopy of volatile hydrocarbons contained in atmospheric air. J. Phys.: Conf. Ser., v.1400, 7, International Conference PhysicA.SPb/2019; St.Petersburg, Russian Federation; 22–24 October 2019. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077058>
5. Saidov, A.S., Usmonov, S.N. & Turgunov, O.Z. Investigation of the Features of the Thermovoltaic Effect in GaSb, GaAs and GaP Binary Compounds. Appl. Sol. Energy 59, 400–409 (2023). <https://doi.org/10.3103/S0003701X23600753>
6. Пронин И.А., Аверин И.А., Божинова А.С., Георгиева А.Ц., Димитров Д.Ц., Карманов А.А., Мошников В.А., Папазова К.И., Теруков Е.И., Якушова Н.Д. Термовольтаический эффект в оксиде цинка, неоднородно легированном примесями с переменной валентностью. Письма в ЖТФ. т. 41. в. 19. с. 23-28, 2015
7. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Каршиев А.Б. Термовольтаический эффект в варизонном твердом растворе Si_{1-x}Gex(0 ≤ x ≤ 1). Письма в ЖТФ, т. 42, в. 14, с.21-27, 2016
- Каминский В.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В., Казанин М.М., Судак Н.М., Залдастанишвили М.И. Исследования термовольтаического эффекта в полупроводниках в среднетемпературном интервале. Изв. ВУЗов России. Радиоэлектроника, т.22, 6, 2019, с. 37 – 44. <http://dx.doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-6-37-44>
8. Каминский В.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В., Shinji Hirai, Yohei Kubota. Термовольтаический эффект в полупроводнике сульфиде церия. Письма в ЖТФ, т.44, вып.23, с.85-89, 2018 <http://dx.doi.org/10.21883/PJTF.2018.23.47014.17235>.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА ПЛАНАРНЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

ВЛАСОВ П.А.

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

Аннотация. В работе представлены разработанные топологии миниатюрных кольцевого и двухшлейфного направленных ответвителей на основе планарных сосредоточенных элементов для частот

в диапазоне дециметровых длин волн. Приведены результаты электромагнитного моделирования в виде частотных зависимостей S -параметров.

Ключевые слова: направленный ответвитель; кольцевой ответвитель; шлейфный ответвитель; моделирование; сосредоточенные элементы; планарные элементы; миниатюризация

Направленные ответвители (НО) являются устройствами, применяемыми в радиотехнических системах, системах связи, для осуществления направленного деления мощности сигнала, а также выполнения функций делителей и сумматоров мощности. Среди направленных ответвителей широко распространен класс так называемых шлейфных ответвителей, изготавливаемых как правило на основе линий передачи с длиной равной четверти эффективной длины волны в данной линии. В диапазоне дециметровых длин волн или же частот ниже границы СВЧ (к примеру УВЧ) использование традиционных полосковых конструкций НО на основе элементов с распределенными параметрами осложняется увеличением их габаритов с уменьшением рабочей частоты. С целью миниатюризации устройств может быть проведена замена длинных отрезков эквивалентными звеньями с сосредоточенными элементами [1-3].

Двухшлейфный НО представляет собой квадратурный ответвитель, то есть НО с разностью фаз сигналов на его выходе равной 90° . Данный НО состоит из двух пар четвертьволновых отрезков, замещенных эквивалентными LC -звеньями с волновыми проводимостями Y_1 и Y_2 , определяемых из системы уравнений (1) [4]:

$$\begin{cases} Y_1 = Y_0 \sqrt{1/K} \\ Y_2 = Y_0 \sqrt{(1+K)/K} \end{cases} \quad (1)$$

где $Y_0 = 1/50$ См – волновая проводимость подводящих линий, K – коэффициент деления по мощности.

Кольцевой ответвитель или кольцевой мост представляет собой НО, состоящий из трех четвертьволновых отрезков и одного отрезка с длиной равной трем четвертям длины волны. Свойством данного ответвителя является обеспечение разности фаз между выходными сигналами 180° при определенном включении. Волновые проводимости звеньев при равенстве входного и выходных волновых сопротивлений подводящих линий Y_0 определяются из системы (2):

$$\begin{cases} Y_1 = Y_0 \sqrt{\frac{K}{1+K}} \\ Y_2 = Y_0 \sqrt{\frac{1}{1+K}} \end{cases} \quad (2)$$

На рисунке 1 изображены схемы двухшлейфного НО (а) и кольцевого моста (б) на идеальных сосредоточенных элементах. Входными портами НО являются порты 4.

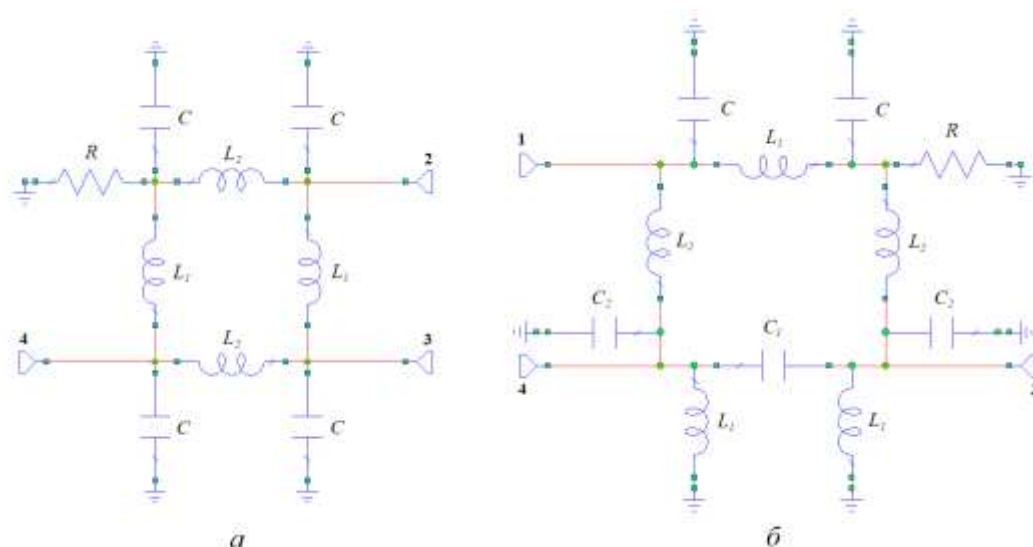


Рис. 1. Принципиальные схемы двухшлейфного НО (а) и кольцевого НО (б) на идеальных сосредоточенных элементах

Расчет параметров номиналов элементов НО был произведен для рабочей частоты $f = 500$ МГц и с коэффициентом деления мощности $K = 4 \pm 0,2$ по формулам (1). В реальном НО вследствие потерь в элементах при расчетных значениях индуктивности и емкости деление мощности будет осуществляться в другой пропорции. С целью уменьшения потерь катушки и конденсаторы располагаются на отдельных кристаллах из плавленого кварца и сапфира и выполнены с разной толщиной металлизации (0,7 и 3 мкм соответственно). Ниже представлена топология двухшлейфного НО на планарных элементах со значениями $C = 8,9$ пФ, $L_1 = 41,3$ нГн и $L_2 = 14,2$ нГн, показанная на рисунке 2. Порты 5-8 подключаются к земле.

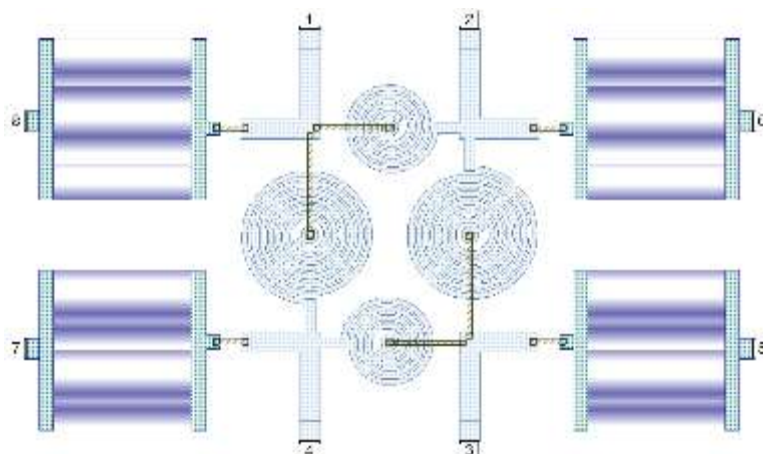


Рис. 2. Топология двухшлейфного НО на планарных элементах

Соединение планарных элементов на отдельных кристаллических подложках осуществляется при помощи воздушных мостиков. S-параметры двухшлейфного НО приведены на рисунке 3. Коэффициент деления по мощности равен 4,03. Рабочее затухание составляет 1,39 дБ и переходное ослабление 7,44 дБ. На центральной частоте обеспечивается сдвиг фаз между выходными сигналами $\Delta\theta$ равный $90,66^\circ$. Рабочий диапазон частот составил 14,2 % при величине направленности в рабочем диапазоне частот не менее 13. Занимаемая устройством площадь составляет $63,5 \text{ мм}^2$.

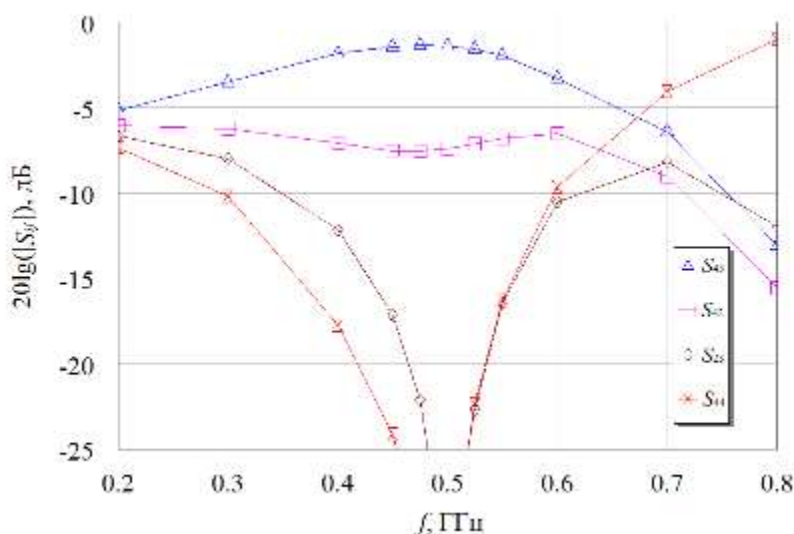


Рис. 3. Частотные зависимости S -параметров двухшлейфного НО на планарных элементах

Топология кольцевого ответвителя, полученная после корректировки номиналов, рассчитанных по формулам системы (2), изображена на рисунке 4. Конструкция ответвителя так же предполагает использование двух монокристаллов сапфира с конденсаторами и одного монокристалла из плавленого кварца, служащим подложкой для катушек с более толстым слоем металлизации. Порты 5 – 8 предназначены для подключения к земле.

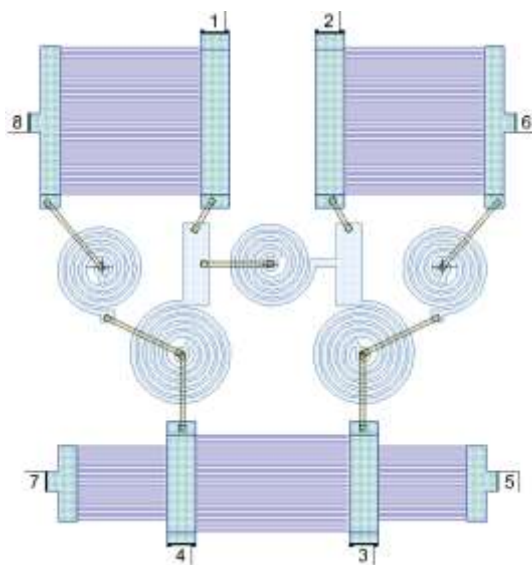


Рис. 4. Топология кольцевого НО на планарных элементах

Скорректированные номиналы элементов составили: $C_1 = 6,3$ пФ, $C_2 = 2,7$ пФ, $C = 9,4$ пФ и $L_1 = 14,9$ нГн, $L_2 = 25,4$ нГн. Индуктивность центральной катушки равной 13,9 нГн, включенной между портами 1 и 2, дополнительно снижена из-за влияния шин конденсаторов. Частотные зависимости S -параметров данного НО приведены на рисунке 5. Рабочий диапазон частот составил 11,2 %. Коэффициент деления по мощности на центрально частоте равен 4,17, рабочее затухание 1,30 дБ и переходное ослабление 7,51 дБ. Минимальная величина направленности в рабочем диапазоне частот составляет 12,5. Разность фаз на рабочей частоте равна $\Delta\Theta = 184,5^\circ$. НО занимает площадь 60,5 мм².

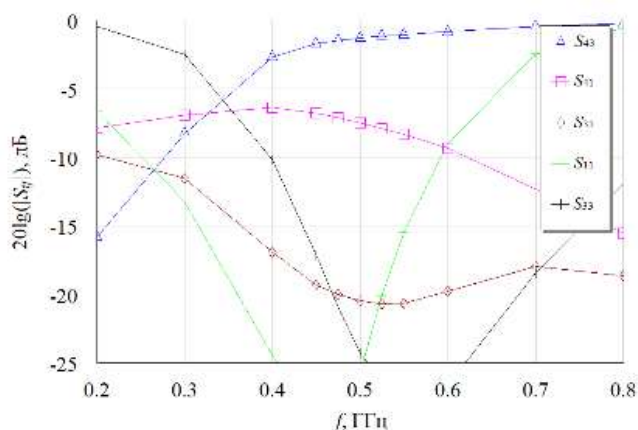


Рис. 5. Зависимость S -параметров от частоты кольцевого НО на планарных элементах

Несмотря на некоторые потери мощности, спроектированные два типа ответвителей могут эффективно работать в узкой полосе частот с рабочим диапазоном, составляющем более 10 %, при занимаемой площади чуть большей чем 60 мм², что более чем 4,5 раза меньше, чем, например, в работе [3], в 9 раз чем в [5], в 15 раз чем в [6], и в 1,8 раза чем в [7].

Список литературы

1. Летавин Д.А. Миниатюризация делителей мощности УВЧ диапазона: монография. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2022. 138 с.
2. Власов П.А. Разработка миниатюрных фазовращателей на планарных сосредоточенных элементах. // Материалы XIII Научно-технической конференции с международным участием "Наука настоящего и будущего" (Санкт-Петербург, 15–17 мая 2025), Т. 3, С. 120-123.
3. Холодняк Д. В., Рыжман И. Н. Малогабаритные делители мощности и направленные ответвители на искусственных длинных линиях в интегральном исполнении. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022, Т. 1. С. 387-391.
4. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
5. Летавин Д.А. Миниатюрные конструкции микрополосковых мостовых устройств // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 917-921.
6. Dao-zhi W., Hui-yong Z., Zhong-wu Y. Compact branch-line coupler using composite right/left-handed transmission lines with novel CSSRR / 2nd Intern. conf. on consumer electronics, communications and networks: CECNet., Yichang, 21-23 april 2012 / China, Yichang, 2012 April, P. 218-221.
7. Ghatak R., Pal M., Sarkar B. Realization of miniaturized quadrature hybrid coupler with reduced length branch arms using recursively loaded stubs // PIER Letters (Progress in Electromagnetics Research Letters). 2013. Vol. 43. P. 45-54.

ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ И СВОЙСТВ ТРАНСПОРТНЫХ СЛОЁВ ДЛЯ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ГАДЖЕЙ А.О., КОЗЛОВ С.В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В работе представлены результаты исследования электрических свойств тонких плёнок на основе Si/Al/Nb₂O₅ и Si/Al/TiO₂. Рассмотрена вольт-фарадная, частотная и вольт-амперная характеристика плёнок. На основе полученных данных сделаны выводы о перспективности использования данных плёнок в перовскитных солнечных элементах в качестве электрон транспортного слоя.

Ключевые слова: Перовскитный солнечный элемент, транспортные слои, электропроводность, тонкие плёнки, ТОПЗ

Перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) являются одной из наиболее перспективных технологий третьего поколения фотовольтаики, достигнув лабораторной эффективности свыше 26% [1-4]. Ключевым фактором, определяющим эффективность и долговременную стабильность ПСЭ, являются транспортные слои – электронно-транспортный (ЭТС) и дырочно-транспортный (ДТС). Они обеспечивают экстракцию носителей, минимизацию рекомбинации и стабильность. Неорганические материалы, такие как TiO_2 , SnO_2 , широко используются, однако обладают недостатками (фотокаталитическая активность, химическая нестабильность). В связи с этим актуален поиск альтернативных материалов с контролируемой дефектностью, высокой диэлектрической проницаемостью и химической стойкостью. В настоящей работе исследованы свойства двух аморфных диэлектриков – $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ и $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$.

В данном исследовании вольт-амперные и ёмкостные характеристики образцов удовлетворительно описываются токами, ограниченными пространственным зарядом (ТОПЗ). ТОПЗ — это режим протекания тока через диэлектрик (или широкозонный полупроводник) с омическими контактами, при котором концентрация инжектированных из электрода носителей заряда значительно превышает концентрацию собственных носителей [5-7]. В этих условиях объёмный заряд инжектированных электронов искажает электрическое поле внутри образца, и ток перестаёт подчиняться закону Ома, приобретая нелинейную зависимость от напряжения.

Для изучения механизма переноса заряда в исследованных структурах проведён анализ ВАХ. Экспериментальные данные для $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ (рис. 1 а) и $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ (рис. 1 б) получены при комнатной температуре (25 °C). Согласно модели ТОПЗ, угол наклона графика в логарифмических координатах будет свидетельствовать об энергии экспоненциального распределения ловушек. Результаты расчетов показали, что для образца $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ эта энергия составляет 0,01эВ, а для $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ - 0,017 эВ.

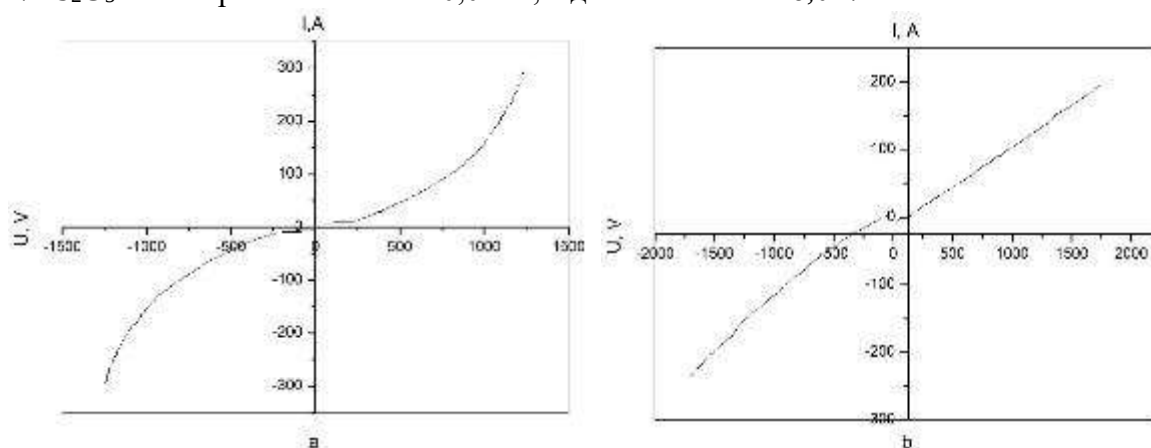


Рис. 1. а – ВАХ $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$, б – ВАХ $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$

Стоит отметить, что наклон ВАХ для $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ заметно выше, чем для $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$, что свидетельствует о большей концентрации и/или глубине ловушечных состояний в титансодержащих плёнках.

Методом вольт-фарадной (C-V) спектроскопии исследована зависимость ёмкости структур от напряжения смещения в диапазоне $-2\text{В} \leq U \leq +2\text{В}$ на частотах от 1 кГц до 500 кГц.

Образцы $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ (рис. 2а) на всех частотах демонстрируют почти полное отсутствие зависимости ёмкости от напряжения - разброс значений не превышает 10-15 % от

среднего. Это является прямым указанием на нейтральный или омический тип контакта на границе металл–диэлектрик. Согласно теории аморфных диэлектриков, высокая плотность ловушечных состояний фиксирует уровень Ферми, и внешнее смещение не приводит к перераспределению объёмного заряда, что и обуславливает постоянство вольт-фарадной характеристики.

Образцы $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ (рис. 2b) проявляют другое поведение. Для образцов $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ (рис.3) на низких частотах (1–5 кГц) наблюдается ярко выраженный релаксационный пик ёмкости при нулевом смещении. Значение $C(U=0)$ в 1,5–2 раза превышает ёмкость при $U=\pm 0,1$ В и более. С ростом частоты тестового сигнала пик сглаживается и полностью исчезает при $f \geq 10$ кГц, а зависимость $C(U)$ становится плоской, аналогичной $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$.

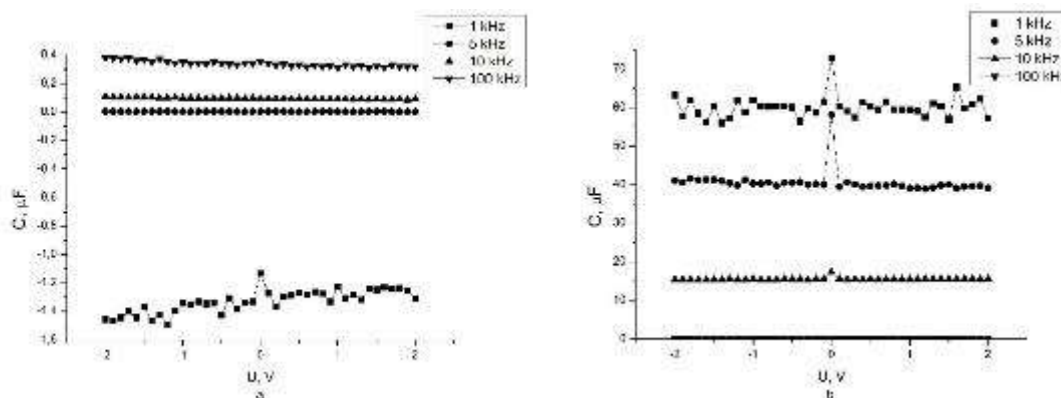


Рис. 2. – C-V характеристики: а - $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$; б - $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$

Природа наблюдаемого пика объясняется наличием встроенного заряда в объёме диэлектрика и глубоких ловушечных состояний, имеющих большое время перезарядки. При нулевом смещении эти ловушки частично заполнены и дают дополнительный поляризационный вклад в ёмкость. При приложении внешнего напряжения ($\pm 0,1$ –2 В) перераспределение заряда снижает этот вклад. На высоких частотах ловушки не успевают перезарядаться, и пик исчезает.

Исходя из C-V сделать вывод, что $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ обладает более широким спектром глубоких ловушек, что согласуется с данными ВАХ.

Также для исследования релаксационных процессов и энергетического распределения ловушек проведены измерения частотных зависимостей ёмкости в диапазоне 1 кГц – 500 кГц при фиксированных напряжениях смещения $U=+1$ В и $U=-1$ В (рис. 4).

Образцы $\text{Si}/\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5$ (рис.4 а) демонстрируют монотонное падение ёмкости более чем на три порядка при увеличении частоты от 1 кГц до 100 кГц. В двойных логарифмических координатах зависимость имеет линейный участок с наклоном $\approx -1,3$. Для анализа распределения ловушек по энергии были использованы те же соотношения, что и при исследовании ВАХ. При комнатной температуре $E \approx 0,034$ эВ. Малое значение энергии указывает на то, что ловушечные состояния сосредоточены в непосредственной близости от дна зоны проводимости, что типично для аморфных оксидных систем с экспоненциальным хвостом локализованных состояний.

При повышении частоты от 1 кГц до 100 кГц образцы $\text{Si}/\text{Al}/\text{TiO}_2$ (рис.4 б) также проявляют сильную частотную дисперсию. Однако из-за наличия релаксационного пика при нулевом смещении на низких частотах количественная оценка по наклону затруднена. При аппроксимации на частотах выше 10 кГц мы получаем $E \approx 0,04$ эВ. Это значение выше,

чем для Si/Al/Nb₂O₅, что указывает на более широкий хвост ловушек и большую концентрацию глубоких состояний в материале на основе титана.

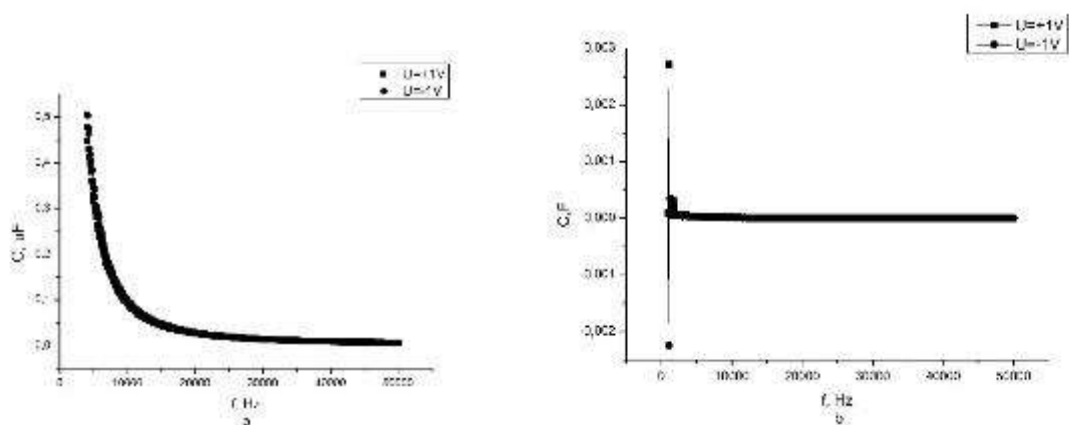


Рис. 4. – частотная характеристика а - Si/Al/Nb₂O₅; б - Si/Al/TiO₂

Сравнение результатов C-f с данными ВАХ и C-V позволяет сделать вывод о том, что доминирующим механизмом проводимости в обоих материалах являются ТОПЗ, а наблюдаемая частотная дисперсия отражает наличие экспоненциального распределения ловушечных состояний в запрещённой зоне.

Было рассмотрено влияние освещения на емкостные характеристики плёнок. Освещение вызывало изменения ёмкости не более 8–12% для Si/Al/Nb₂O₅ и в пределах 15% для Si/Al/TiO₂, что свидетельствует о слабой фоточувствительности исследованных плёнок в видимом диапазоне. Это важно для ПСЭ, так как транспортный слой не должен поглощать свет и создавать паразитные фототоки.

Таким образом, можно сказать, что Si/Al/Nb₂O₅ подходит для дальнейшей апробации в качестве электронно-транспортного слоя в составе полноценных перовскитных солнечных элементов. Это обуславливается отсутствием паразитной релаксации, меньшей концентрацией и глубиной ловушек, что увеличивает эффективность экстракции электронов. Более слабой фоточувствительностью и высокой стабильностью большинства параметров.

Список литературы

1. Ryabko, A.; Ovezov, M.; Tuchkovsky, A.K.; Korepanov, O.; Maximov, A.I.; Lazneva E. F.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Aleshin, A.N.; Moshnikov, V.A. Synthesis, Structure, and Optoelectronic Properties of a Hybrid Organic–Inorganic Perovskite with a Monoethanolammonium Cation MAxMEA1–xPbI3. *Nanomaterials*. 2025, 15(7): 494. doi: 10.3390/nano15070494.
2. 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. <https://doi.org/10.3390/ma18173977>
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 6 th 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.
5. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Maximov, A.I.; Ryabko, A.; A.K.; Gagarina A.Yu.; Kozodaev, D.A. Electrical Properties and Charge Transfer Mechanisms in Nanoscale Anodic TiO2 Films at Low Applied Voltages // *Inorganics* 2026, 14, 29 <https://doi.org/10.3390/inorganics14010029>

6. Muratova E.N., Ryabko A.A., Moshnikov V.A., Vrublevsky I.A., Maximov A.I., Tuchkovsky A.K. Electron transport, charge transfer and localized states of charge carriers in nanosized anodic TiO₂ films // *Nanomanufacturing* 2026, 6, 6. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing6010006>
7. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Bessonov, V.B.; Parfenovich, S.E.; Maximov, A.I.; Gagarina A.Yu.; Kovalenko D.A.; Kozodaev, D.A. Influence of Temperature on Electron Transport, Current-Voltage Characteristics, and Capacitive Properties of MIM Nanostructures with Amorphous Niobium Pentoxide // *Applied Nano*. 2026 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/applnano7010008>
8. Потупалова Л.М., Штуберт А.Ю., Штуберт О.М. Электропроводность тонких диэлектрических пленок. – 2003.
9. Наночастицы, наносистемы и их применение. Альтернативная энергетика: учеб. пособие / под ред. В. А. Мошникова, Е. Н. Муратовой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 112 с.
10. Наночастицы, наносистемы и их применение. Перспективные фотоактивные системы для солнечной энергетики / под ред. В. А. Мошникова, Е. Н. Муратовой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. 233 с.
11. Spivak, Y.; Muratova, E.; Moshnikov, V.; Tuchkovsky, A.; Vrublevsky, I.; Lushpa, N. Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites // *Materials*, 2022, 15 (3), P. 990. <https://doi.org/10.3390/ma15030990>
12. Moshnikov V, Muratova E, Aleshin A, Maksimov A, Nenashev G, Vrublevsky I, Lushpa N, Tuchkovsky A, Zhilenkov A, Kichigina O. Controlled Crystallization of Hybrid Perovskite Films from Solution Using Prepared Crystal Centers. *Crystals*. 2024; 14(4):376
13. Nenashev G. V., Aleshin A. N., Ryabko A.A., Shcherbakov I. P., Moshnikov V. A., Muratova E. N., Kondratev V. M., Vrublevsky I. A. Effect of barium doping on the behavior of conductivity and impedance of organic-inorganic perovskite films // *Solid State Communications*, Vol. 388, 2024, P.115554, <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115554>
14. Гагарина А.Ю., Безверхний В.П., Муратова Е.Н., Мошников В.А., Врублевский И.А., Тучковский А.К. Лушпа Н.В. Получение и свойства наноразмерной пленки диоксида титана для транспортного слоя n-типа фотовольтаической ячейки // *Физика и техника полупроводников*. 2024. Т. 58. № 11. С. 591-593.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ

ГОВЕНЬКО И.В., КОРЕНЕВ К.А., ПЛАТОНОВ Р.А.

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

Аннотация. В работе предложен способ расчета эффективной диэлектрической проницаемости композитных материала с случайным распределением дефектных полых стеклянных микросфер частиц на основе комбинации методов численного моделирования и известных правил смеси. Показано, что увеличение доли дефектных микросфер приводит к увеличению диэлектрической проницаемости композитного материала. Предложенный метод может быть использован при оптимизации технологических параметров при изготовлении образцов композитного материала методом компрессионного прессования.

Ключевые слова: эффективная диэлектрическая проницаемость, композитные материалы, логарифмическое правило смеси

Введение

Развитие телекоммуникаций и радиолокации требует повышения рабочих частот устройств до 60–90 ГГц, что стимулирует поиск способов увеличения эффективности излучения печатных антенн. Одно из решений — использование материалов с низкой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r < 4$) [1–4] для СВЧ печатных плат. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) остаётся практически единственной основой для таких композитов благодаря уни-

кальному набору свойств: низкому тангенсу диэлектрических потерь ($<0,002$), гидрофобности и термической стабильности. Снизить ϵ_r композита можно, используя в качестве наполнителя полые стеклянные сферы (ПСМ) [5–6]. Однако при компрессионном прессовании (давление 10–30 МПа) часть ПСМ разрушается, что из-за ϵ_r материала оболочки $\approx 4,6$ не уменьшает, а увеличивает проницаемость. Возникает необходимость определить допустимую долю разрушенных сфер. Традиционные правила смесей имеют ограниченную применимость и для сложных композитов могут давать ошибку.

В данной работе представлены результаты численного моделирования влияния доли дефектных ПСМ на эффективную диэлектрическую проницаемость композита на основе ПТФЭ.

Методы моделирования

Более универсальный подход — расчёт эффективной диэлектрической проницаемости методом конечных элементов (МКЭ). Из объёма композита выделяют модельную структуру, например, элементарную ячейку (ЭЯ), свойства которой определяют параметры композита. Простейшая ЭЯ — куб с ребром a , в центре которого находится полая сфера с толщиной оболочки 0,75 мкм, заполненная воздухом. Диэлектрическая проницаемость оболочки (SiO_2) — 4,6, матрицы (ПТФЭ) — 2,9. Рассмотрены два типа включений: целая полая стеклянная микросфера (заполнена воздухом) и дефектная сфера, состоящая из двух половин оболочки, заполненных материалом матрицы (см. рисунок 1).

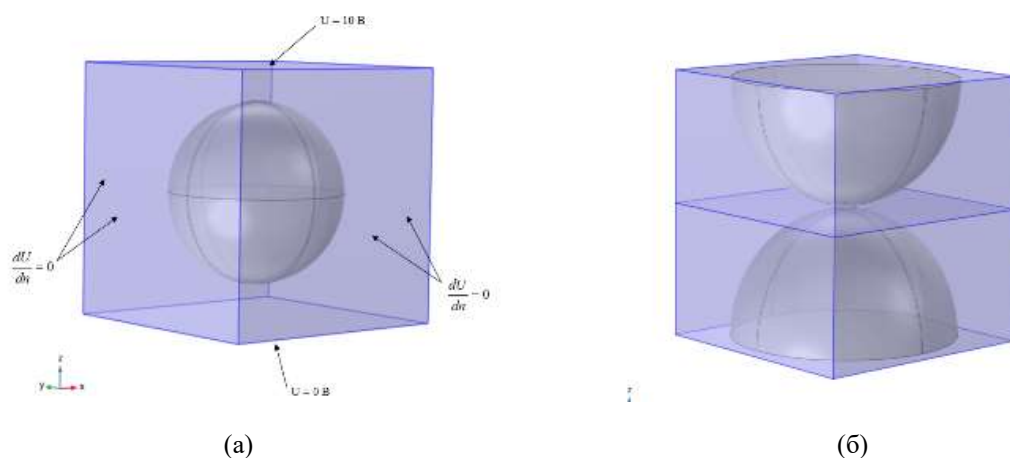


Рис. 1. Модель простой кубической элементарной ячейки: (а) — со сферической частицей наполнителя, (б) — модель ячейки с дефектной сферой

Расчёт распределения электрического поля внутри ЭЯ выполнялся в электростатическом режиме. ЭЯ рассматривалась как диэлектрическое заполнение плоскопараллельного конденсатора, формируемого граничными условиями на противоположных гранях. По полученному полю вычислялась электрическая емкость, после чего определялась эффективная диэлектрическая проницаемость [7-8]:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \rightarrow \epsilon_{eff} = \frac{Cd}{\epsilon_0 S} \quad (1.1)$$

где d — толщина ячейки, S — площадь обкладки, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Для моделирования трёхмерного случайного композита с дефектами используется логарифмическое правило смеси (частный случай формулы Лихтенекера [9] при $k \rightarrow 0$):

$$\varepsilon_{eff} = \exp(\varphi_1 \cdot \ln(\varepsilon_1) + \varphi_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \dots + \varphi_n \cdot \ln(\varepsilon_n)) , \quad (1.2)$$

где φ_n – объёмные доли компонентов, ε_n – их диэлектрические проницаемости, а $\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = 1$. Данное правило занимает промежуточное положение между теоретическими пределами Рейса (последовательная смесь) и Фойга (параллельная смесь) и демонстрирует хорошую точность для дисперсий с низким расхождением диэлектрические проницаемости.

Результаты моделирования показали, что в случае с целыми ПСМ увеличение объёмной доли наполнителя закономерно снижает общую диэлектрическую проницаемость материала. Однако для дефектных ПСМ наблюдалась обратная картина: поскольку диоксид кремния имеет более высокую диэлектрическую проницаемость, чем ПТФЭ, их появление в структуре вело к росту эффективного значения.

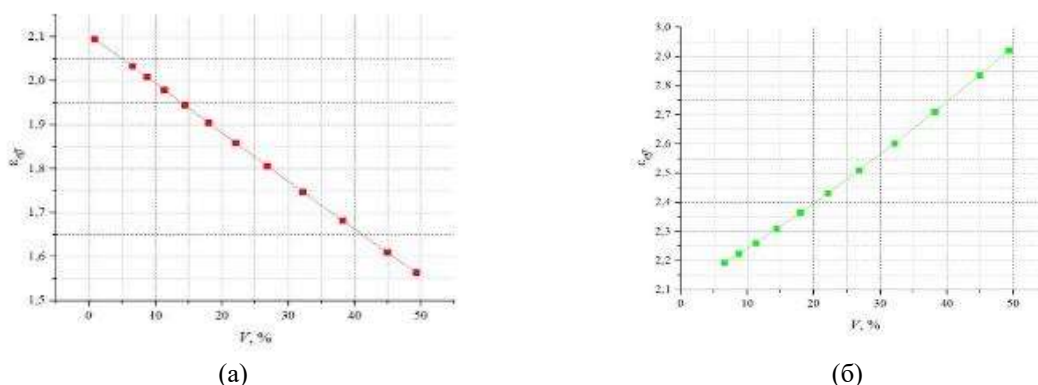


Рис. 2. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от объёмной доли ПСМ в ПТФЭ: (а) – полая стеклянная микросфера без дефекта, (б) – дефектная стеклянная микросфера

Для перехода от идеализированных решёток к статистическим структурам реализован алгоритм случайной генерации трёхмерного массива из трёх типов ячеек (ПТФЭ, целые и дефектные ПСМ) в заданном соотношении. Эффективная проницаемость вычислялась по обобщённому логарифмическому правилу смеси. Модель основана на двухуровневом представлении: массив состоит из кубических ячеек, часть которых (доля f) содержит сферу SiO_2 , занимающую половину объёма ячейки ($\varphi_{cell} = 0.5$), а остальные ячейки заполнены ПТФЭ. Итоговая объёмная доля наполнителя определяется соотношением $\varphi_{total} = f \cdot \varphi_{cell} = 0.5 \cdot f$.

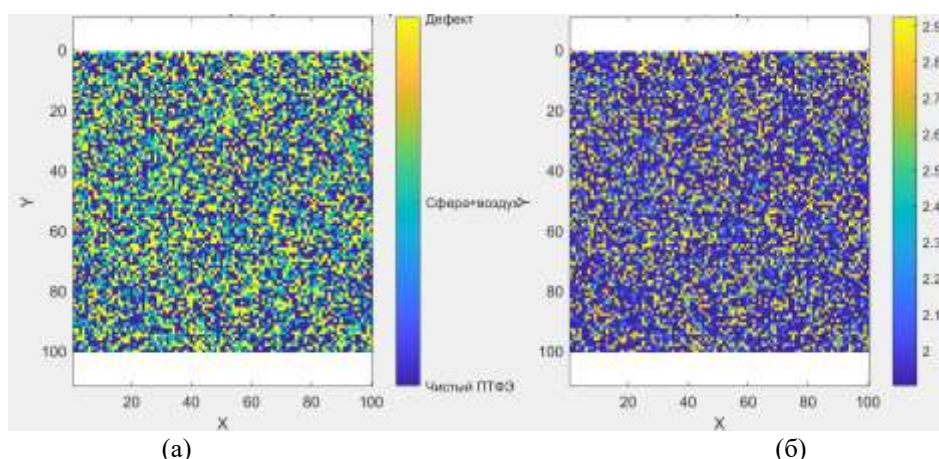


Рис. 3. (а) – Центральное сечение случайного композита: синий (ПТФЭ, зелёный – целые сферы, жёлтый – дефекты); (б) – значения ε в центральном слое трёхмерного композита

На следующем этапе был проведен параметрический анализ: при фиксированной общей концентрации наполнителя ($\varphi_{total} = 12.5\%$) доля дефектных микросфер варьировалась от нуля до ста процентов. Результаты подтвердили обнаруженную ранее тенденцию: чем больше в материале дефектных микросфер, тем выше его эффективная диэлектрическая проницаемость. Причем эта зависимость носит монотонный и практически линейный характер.

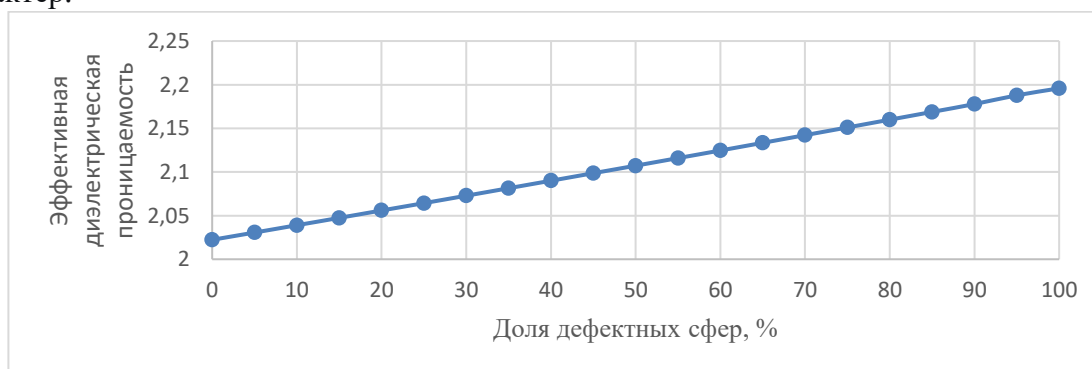


Рис. 4. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от доли дефектов в трёхмерной модели

Заключение

Предложенный подход, объединяющий метод конечных элементов и логарифмическое правило смеси, позволяет оценивать эффективную диэлектрическую проницаемость композитов ПТФЭ/ПСМ с учётом дефектных включений. Показано, что модель адекватно воспроизводит практически линейную зависимость ε_r от доли разрушенных микросфер, что даёт возможность определять допустимую концентрацию дефектов. Метод конечных элементов обеспечивает наглядность и физическую обоснованность результатов для регулярных структур, а логарифмическое правило смеси — простоту обобщения на многокомпонентные системы со случайным распределением фаз при минимальных вычислительных затратах, что делает предложенный подход удобным инструментом для прогнозирования свойств композитных материалов на этапе проектирования.

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

Список литературы

1. Polytetrafluoroethylene composites for high-frequency microwave applications: balancing thermal conductivity, adhesion and dielectric properties/ He L., Zhang Y., Liu X. et al. // Composites Science and Technology. – 2025. – Т. 261. – С. 111012.
2. Preparation and properties of silica filled PTFE flexible laminates for microwave circuit applications/ Murali K. P., Madhu G., Sreekumar P. A. et al. // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2009. – Т. 40. – №. 8. – С. 1179–1185.
3. Sauter K., Bertling S. PCB laminates (including high speed requirements) // Lead-free soldering process development and reliability. – 2020. – С. 307–319.
4. Tong C. PCB materials and design requirements for 5G systems // Advanced materials and components for 5G and beyond. Cham : Springer Nature Switzerland. – 2022. С. 77–108.
5. Чурсова Л. В., Соколов И. И., Лукина А. И. Разработка полимерных синтактичных и пеноматериалов нового поколения с повышенными эксплуатационными характеристиками // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60. – №. 2. – С. 67–73.
6. Чухланов В. Ю., Митрофанов А. Д., Мамонтов В. М., Шарафанов В. Т., патент SU 1781241A1, Способ получения термостойкого синтактичного композита, 1992 г.
7. Платонов Р. А. и др. Метод расчета эффективной диэлектрической проницаемости материала с периодически распределенными неоднородностями // Пластические массы. – 2025. – №. 6. – С. 33–35.
8. Будько А.А., Васильева О.В. Моделирование статических электромагнитных полей и расчёт параметров в COMSOL Multiphysics. – 2005. - №9.
9. K. Lichtenecker. Dielectric constant of natural and synthetic mixtures. Zeitschrift fur Physik. 1926. P. 115–158.

КАРБОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПОДЛОЖЕК ИЗ КОНСТРУКЦИОННОГО ГРАФИТА

ГРИГОРЕНКО М.С., БЫКОВ Ю.О.

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

Аннотация. Конструкционный графит широко используется во многих областях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Однако этот материал обладает существенными недостатками (пористость, окисление на воздухе при температуре выше 400 °С и т.д.). Для устранения естественных недостатков графита на графитовые изделия наносят защитные покрытия. В данной работе поверхность подложек из конструкционного графита модифицировались покрытиями из карбида кремния. Покрытия формировали, используя двухстадийный процесс, включающий нанесение кремнийсодержащей суспензии с последующим высокотемпературным (1500–2000 °С) отжигом. Во время отжига на подложках протекала реакция карботермического синтеза с образованием карбида кремния. Полученные покрытия обладают сплошностью и хорошей адгезией. Фазовый состав слоев неоднороден.

Ключевые слова: карбид кремния, защитное покрытие, конструкционный графит

Введение

Конструкционный графит – высокотехнологичный материал, который вследствие своих уникальных свойств широко используется в металлургии, полупроводниковой технологии, атомной и солнечной энергетике, аэрокосмической технике, химической промышленности и т.д. Он сохраняет свои механические свойства при экстремально высоких температурах: детали на его основе могут использоваться при температурах до 3000 °С в инертной атмосфере и до 450 °С в окислительной среде. Материал обладает высокой теплопроводностью, имеет низкий коэффициент линейного теплового расширения, низкую

плотность, примерно 1,7-1,9 г/см³, и хорошо поддается механической обработке; его свойства и структура позволяют изготавливать легкие изделия сложных форм с малыми допусками и высокой точностью. Графит химически инертен к большинству агрессивных сред. Он не подвержен коррозии в нормальных условиях. Демонстрирует высокую радиационную стойкость, сохраняя свои свойства под воздействием нейтронного облучения.

Однако графит отличается некоторыми принципиальными недостатками: он легко окисляется кислородом воздуха при температуре выше 400-500 °С. Кроме того, материал вступает в реакцию со многими расплавами металлов с образованием карбидов. Он мягок и легко разрушается при абразивно-эрозионном воздействии. Наконец, графит – пористый материал, который поглощает жидкости и газы, находящиеся с ним в контакте.

Рассмотренные отрицательные свойства в значительной степени ограничивают область применения конструкционного графита. Чтобы улучшить химические, термические и механические характеристики изделий из этого материала, их поверхности должны быть модифицированы защитными покрытиями. Наиболее часто для этого используются такие соединения, как карбид тантала или карбид титана. Изготовленные из них покрытия отличаются высокой прочностью, термостабильностью и химической стойкостью [1,2].

Несмотря на перечисленные преимущества, эти материалы не всегда являются оптимальным вариантом для использования в качестве защитных слоев ввиду их высокой стоимости. Дешевой альтернативой является использование карбида кремния. В экстремальных условиях, особенно в диапазоне 1600-1700 °С на воздухе, этот материал демонстрирует высокую термическую стабильность и абразивную стойкость, что делает его идеальным для высокотемпературных применений [3]. Также соединение характеризуется стойкостью к окислению и радиации, а также химической инертностью и высокой твердостью (9,5 по шкале Мооса). Его температурный коэффициент линейного расширения равен $4,5 - 5,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и примерно совпадает со значением для графита. Благодаря этому покрытие SiC на графите не претерпевает растрескивания при перепадах температур.

Целью данной работы являлся синтез защитного покрытия карбида кремния для модификации поверхности подложки из конструкционного графита.

Экспериментальная часть

В качестве основы для нанесения покрытия использовались подложки из графитов популярных марок, выпускаемых отечественной промышленностью, а именно: мелкозернистый плотный графит МПГ6, получаемый методом прессования, и изостатический графит И1.

Нанесение слоя производилось при комнатной температуре жидкофазным методом, равномерное распределение обеспечивалось посредством центрифугирования. После этого образцы подвергались сушке на воздухе. Затем проводился отжиг нанесенного покрытия при температуре до 1900 °С в атмосфере аргона при давлении 20–50 кПа в течение 3–5 часов.

Для создания покрытия были изготовлены суспензии различных составов, где в качестве адгезива использовался раствор поливинилбутирала (2%) с резольными фенолформальдегидными смолами, а в качестве растворителя – изопропиловый спирт. В качестве источника кремния использовали диоксид кремния SiO₂ (мелкодисперсная кварцевая мука с размером частиц 15 мкм, чистота 99,8 %) и порошок кремния Si (размер частиц 20 мкм, чистота 99,9999%).

Полученные покрытия диагностировались методами рентгенофазового анализа (РФА) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Для оценки толщины слоя и сплошности покрытий были получены металлографические шлифы образцов.

Обсуждение результатов

Эксперименты с диоксидом кремния не привели к оптимальному результату. SiO_2 размягчался при температуре выше 1550°C , но не проникал в поры графита (вероятно, вследствие высокой вязкости расплава). При 1600°C протекала реакция: $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}\uparrow$. Реакция приводила к образованию карбида кремния модификации 3C-SiC. Однако при дальнейшем повышении температуры до 1800°C начинался процесс сублимации получившегося соединения, и покрытие покидало графитовую подложку. По всей видимости, массоперенос карбида кремния оказался интенсивным из-за потока угарного газа из реакционной зоны. В ходе гравиметрического анализа отожженных образцов отмечено, что прирост по массе отсутствовал, более того, на подложке обнаружены следы травления графита, что подтверждает протекание указанной реакции (см. рис. 1 а).

Использование порошка кремния оказалось более удачным вариантом. Расплав кремния протекал в поры подложки при температурах выше точки плавления (1470°C). При 1600°C начиналась реакция карботермического синтеза: $\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SiC}$. Возникла метастабильная кубическая модификация 3C-SiC. Повышение температуры до 1800°C приводило к перестраиванию кристаллической решетки и образованию политаипа 6H-SiC на некоторых участках подложки. Визуальный осмотр образца подтвердил наличие покрытия с хорошей адгезией (см. рис. 1 б). Прирост массы образца оказался положительным.

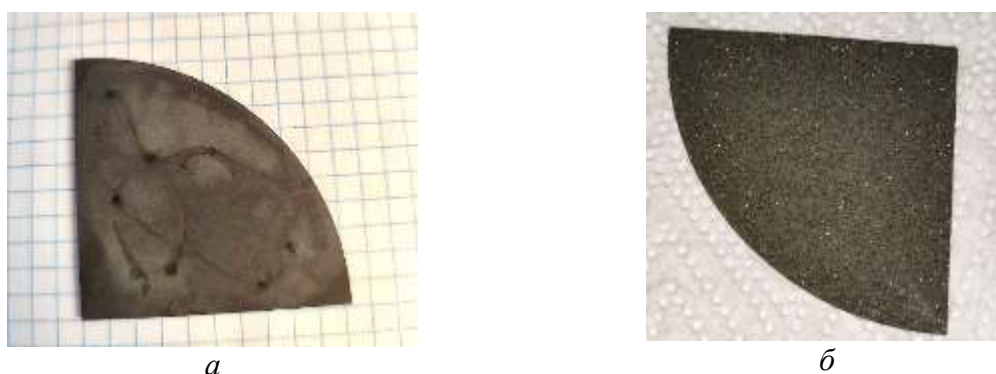


Рис. 1. Фотографии подложек, источником основного вещества для покрытия которых являлись: а - кварцевая мука, б - порошок кремния

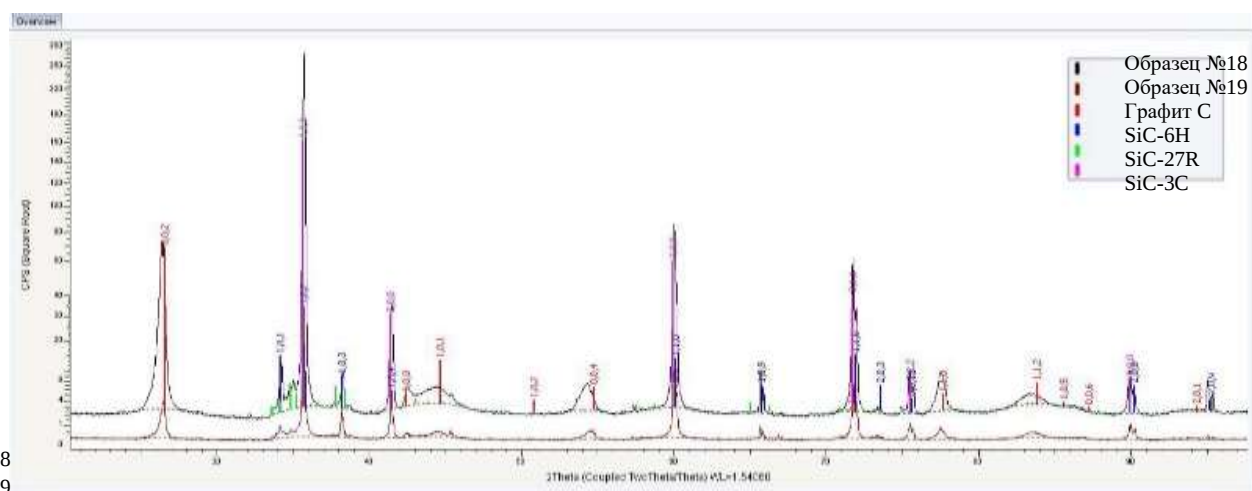




Рис. 3. Оптическая микрофотография участка шлифа

Рентгеновский фазовый анализ (рис. 2) показал, что карбидокремниевое покрытие на основе порошка кремния состоит из смеси политипов 3С, 6Н и 27R. Образцы, для которых была сделана дифрактограмма, отличаются только маркой графита подложки (№18 – И1, №19 – МПГ6). По оптическому контрасту участков шлифа образца №18 (рис. 4) можно сделать вывод о том, что глубина модифицированного слоя достигает более 300 мкм. Это значение оказалось больше предполагаемой толщины, рассчитанной из прироста материала по массе, что свидетельствует о пористости полученного покрытия.

РСМА позволил изучить химический состав образца и подтвердил, что расплав кремния проникает в графит по порам, взаимодействуя с их поверхностью. На рис. 5 видно, что на поверхности подложки образовался тонкий сплошной слой покрытия толщиной более 10 мкм.

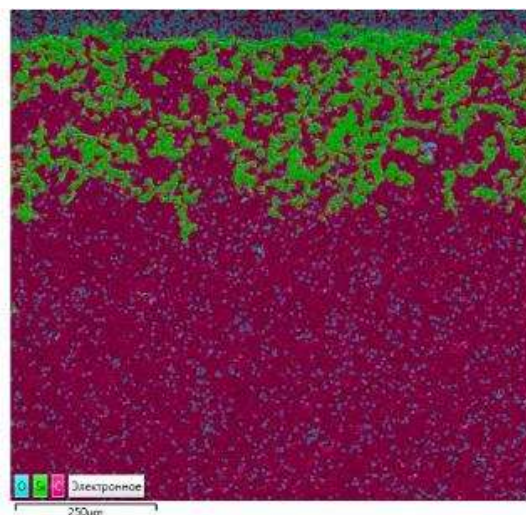


Рис. 4. РСМА-изображение участка шлифа

Заключение

Жидкофазный процесс нанесения кремния на графитовую подложку с последующей реакцией карботермического синтеза оказался технологически простым и дешевым способом получения защитного слоя карбида кремния. Полученные покрытия обладают сплошностью и хорошей адгезией, толщина однородного по химическому составу слоя

превышает 10 мкм. Структура оказалась не однофазной: РФА подтвердил наличие трех полиморфов карбида кремния.

Список литературы

1. Афанасьев А. В., Быков Ю. О., Лебедев А. О., Марков А. В., Шаренкова Н. В., Латникова Н. М. Покрытие из карбида титана для графитовой арматуры высокотемпературных процессов // Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия. 2025, вып. № 5. С. 70–79.
2. Сытченко А. Д., Фатыхова М. Н., Кузнецов В. П., Купцов К. А., Петржик М. И., Кудряшов А. Е., Кирюханов-Корнеев Ф. В. Покрытия на основе карбида тантала, полученные методами магнетронного распыления и электроискрового легирования, для повышения износостойкости деталей запорной арматуры // Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия. 2023, вып. № 3. С. 67–78.
3. Qian-Gang Fu, He-Jun Li, Xiao-Hong Shi, Ke-Zhi Li, Guo-Dong Sun. Silicon carbide coating to protect carbon/carbon composites against oxidation // Scripta Materialia. 2005. Т. 52. № 9. С. 923–927.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ РФЭ-СПЕКТРОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ

Гришечкина С.О.¹, Андреева Н.В.¹, Вилков О.Ю.²

¹НИЛ «НМЭВП» СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²СПбГУ, кафедра физики твердого тела

Аннотация. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и теории функционала плотности (ТФП) исследовано влияние поверхности на электронную структуру эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок титаната бария (BaTiO_3). В эксперименте обнаружено, что в спектрах Ba 3d и Ba 4d наблюдаются три дублета. Чтобы разобраться в многокомпонентной природе спектров бария проведено моделирование тонкой BaTiO_3 -плёнки с помощью ТФП-расчетов. Показано, что релаксация поверхности приводит к перераспределению электронной плотности валентных электронов бария, следствием которого является изменение энергии связи электронов внутренних уровней Ba 3d и Ba 4d и появление в спектре дублета, ассоциируемого с поверхностным слоем сегнетоэлектрической пленки.

Ключевые слова: титанат бария, сегнетоэлектрические плёнки, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, химический сдвиг, теория функционала плотности, поверхностная релаксация

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

Исследовались эпитаксиальные сегнетоэлектрические (СЭ) плёнки титаната бария в структуре SrTiO_3 (подложка)/ $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (15 нм, нижний электрод)/ BaTiO_3 (3 нм, эпитаксиальная СЭ пленка) [1]. Анализ тонкой структуры РФЭ-спектров основных уровней Ba 3d и Ba 4d выявил их многокомпонентную природу (рис. 1). Из рисунка 1 видно, что 3d и 4d спектры Ba представлены тремя компонентами. При этом сигнал Ba1 принадлежит самому далекому от поверхности слою, а Ba3 – самому поверхностному слою. Это очевидно из сравнения отношения интенсивностей Ba3/Ba2 и Ba1/Ba2 для 3d и 4d регионов. Поскольку кинетическая энергия фотоэлектронов в области Ba 4d линии существенно выше, чем в области Ba 3d, форма спектра Ba 3d оказывается более чувствительной к особенностям приповерхностного слоя. При переходе к более поверхностно-чувствительному 3d спектру больше других уменьшается интенсивность компоненты Ba1, а увеличивается – компоненты Ba3.

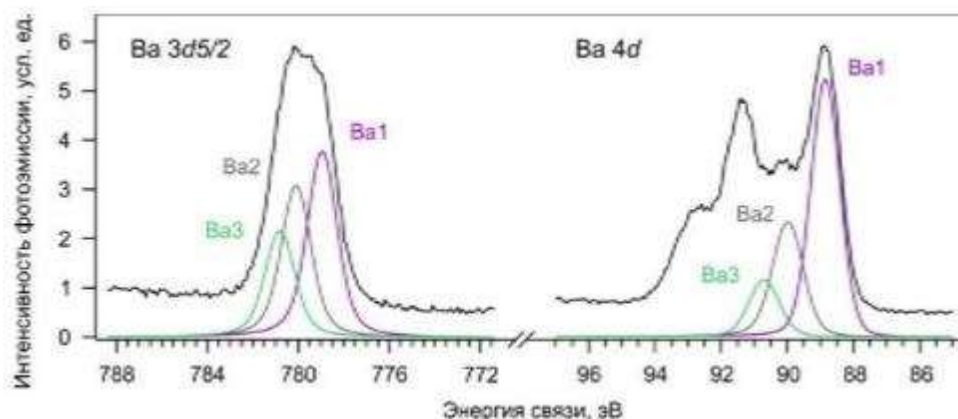


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры внутренних уровней Ba 3d и Ba 4d, полученные с эпитаксиальной пленки титаната бария в исходном состоянии до травления. Для удобства восприятия показаны

спектральные компоненты только со стороны линии $pd_{5/2}$.

Таким образом, компонента Ba3 спектра 3d, смещённая в сторону больших энергий связи на 1,25 эВ, связывается с приповерхностной областью плёнки, где поляризация и структура отклоняются от объёмных, а компонента Ba1 – с атомами Ba в «объёмной» сегнетоэлектрической фазе пленки.

Для установления физических механизмов, обуславливающих вид 3d и 4d спектров Ba, были проведены *ab initio* расчёты в рамках теории функционала плотности (ТФП) с использованием полнопотенциального метода присоединённых плоских волн (ПП-ЛППВ) в программном пакете WIEN2k [2]. Обменно-корреляционное взаимодействие описывалось в приближении Пердю–Бурке–Эрнцгергофа (PBE) [3]. Моделировалась суперячейка (1x1x7) BaTiO₃ с BaO-терминацией, состоящая из 7 элементарных ячеек (рис. 2), разделённых вакуумным промежутком ~16 Å и построенная на основе тетрагональной ячейки с параметрами $a=b=3,998\text{Å}$, $c=4,041\text{Å}$ [4]. Расчёт прекращался при одновременном выполнении условий сходимости: по полной энергии – 0,0001 Ry, по зарядовой плотности – 0,01 е и по силам, действующим на атомы, – 1,0 мRy/бор. Расчёт спин-орбитального расщепления проводился с помощью программы lapwso во второй вариационной схеме.

Нижняя ячейка (номер 1 на рис.2), моделирующая влияние подложки, фиксировалась так, что атомы титана находились в центрах кислородных октаэдров, а атомы кислорода в BaO-слоях лежали в одной плоскости с атомами бария. Для остальных шести ячеек в процессе релаксации находились устойчивые положения атомов, в которых действующие на них силы были уравновешены.

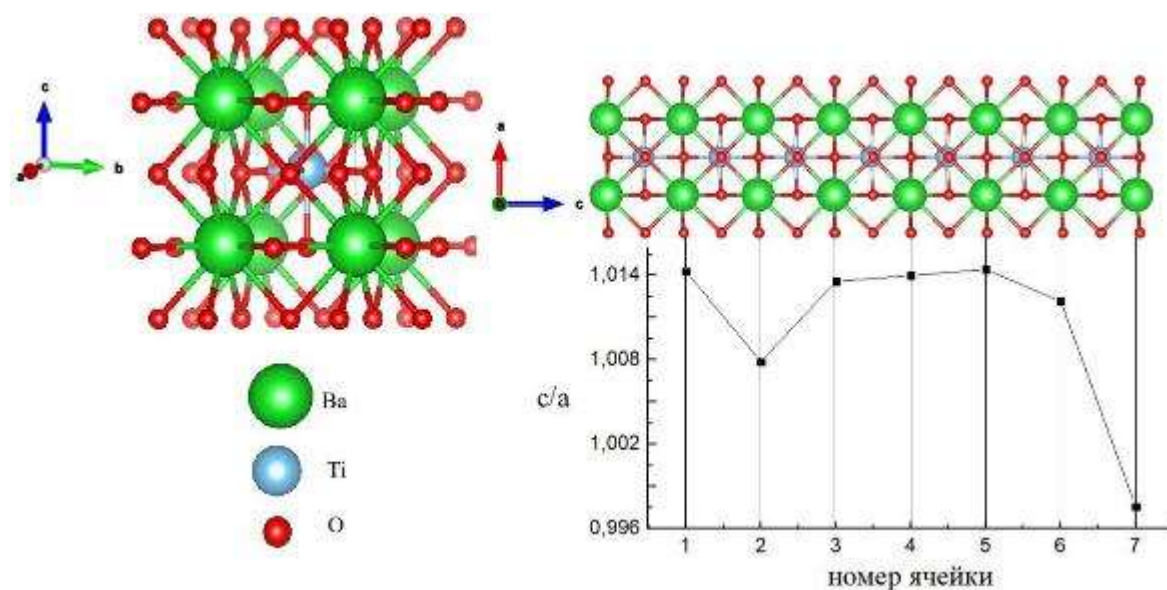


Рис. 2. Зависимость параметра c/a в различных ячейках плёнки BaTiO_3 после релаксации. Номер ячейки 7 соответствует поверхности.

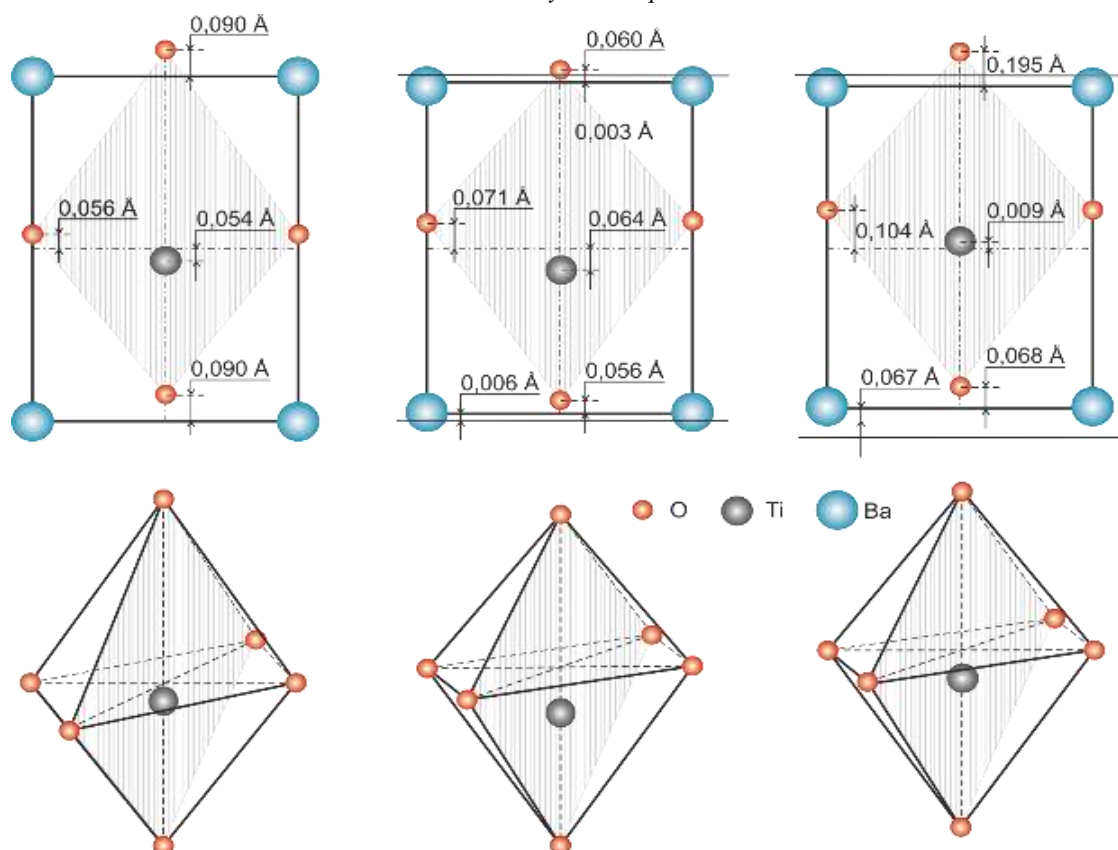


Рис. 3. Иллюстрация искажения кислородных октаэдров в исходной BaTiO_3 -ячейке (из которой составлялся слэб), ячейки в «объёмной» части плёнки и приповерхностной ячейке (слева направо).

По результатам релаксации установлено немонотонное изменение параметра c/a в направлении к поверхности плёнки (рис. 2). В «объёмной» части (ячейки с номерами 3 - 6) параметр c/a составляет $\sim 1,014$. По мере приближения к поверхности элементарная

ячейка испытывает сжатие вдоль оси c , и параметр c/a для верхней ячейки уменьшается до 0,998. Данное сжатие вызывает искажение кислородных октаэдров TiO_6 в приповерхностной области (рис. 3).

Анализ пространственного распределения плотности валентных электронов показал ее уменьшение в поверхностном слое вблизи атомов Ва (рис. 4). Данное обстоятельство должно приводить к сдвигу 3d и 4d уровней Ва в сторону больших энергий связей, что подтверждается результатами ТФП расчётов: при переходе от приповерхностного ВаО-слоя к поверхностному расчётная энергия связи электронов Ва $3d_{5/2}$ уровня возрастает от 743,9 эВ до 744,4 эВ, что коррелирует с результатами исследований методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

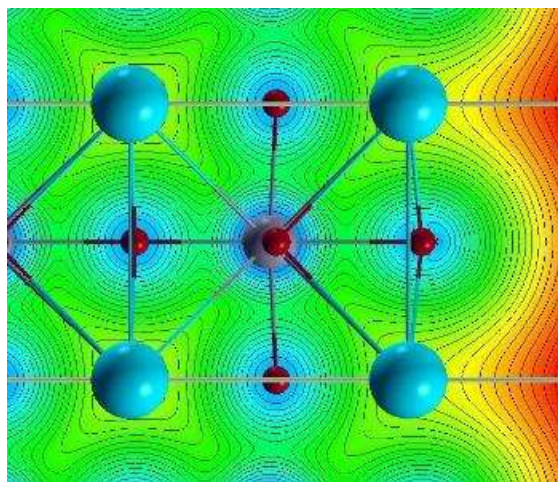


Рис. 4. Распределение плотности валентных электронов в объёме (слева) и на поверхности (справа) плёнки BaTiO_3 .

Таким образом, результаты ТФП-расчетов позволили установить, что появление Ва1-компоненты в РФЭ-спектре BaTiO_3 -плёнки с ВаО-терминацией обусловлено поверхностной релаксацией. Закреплённая нижняя ячейка моделирует внутренний интерфейс с подложкой и создаёт асимметрию граничных условий. Это приводит к тому, что структурное искажение меняется от слоя к слою, и вместе с поляризацией приводит к изменению эффективного заряда атомов бария. Совместное действие поверхностной релаксации и внутреннего интерфейса определяет послойное изменение зарядового состояния Ва, которое проявляется в эксперименте в виде многокомпонентной структуры Ва 3d и Ва 4d РФЭ-спектров.

Список литературы

1. Andreeva N.V., Petukhov A., Vilkov O., Petraru A., Luchinin V. Local electric properties modification of ferroelectric tunnel junctions induced by variation of polarization charge screening conditions under measurements with scanning probe techniques // *Nanomaterials*. - 2021. - Vol. 11. - P. 3323.
2. Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., et al. WIEN2k: An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties. – Vienna University of Technology, 2024.
3. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 77. – P. 3865–3868.
4. Natheer B. Mahmood, Emad K. Al-Shakarchi. Three Techniques Used to Produce BaTiO_3 Fine Powder // *Journal of Modern Physics*. – 2011. – Vol. 2. – P. 1420–1428. DOI: 10.4236/jmp.2011.211175. Crystallography Open Database (COD), ID: 1507756.

РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ СТЕНДА ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ

Гудков Е.И.

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

Аннотация. Целью работы являлась разработка печатной платы, служащая универсальной площадкой для проведения тестирования работоспособности электронных блоков, используемых в медицинских приборах эндоскопического направления.

Ключевые слова: стенд, электронный блок, печатная плата

Введение

При любом производстве какого-либо продукта, начиная от индивидуального изготовления на дому и заканчивая потоковым изготовлением госкорпорациями, одной из важнейших задач является обеспечение качества выпускаемой продукции. Контроль за качеством затрагивает все этапы производства, например, контроль комплектующих до начала производства (входной контроль); промежуточная проверка каждого отдельного узла сложного устройства и их совместная проверка; приёмо-сдаточные испытания готового изделия; а также, постпродажный контроль качества [1]. Существуют различные методы контроля продукции, каждый подходит под свои определённые цели и имеет определённые достоинства и недостатки.

Выбор управляющего блока и способа регистрации проверки

Проверка электронных блоков не подразумевает под собой визуального воспроизведения корректной работы из-за необходимости подключения полной периферии устройства в виде других электронных блоков и механических узлов, в котором используется данный электронный блок. Также, в таком случае увеличивается время проверки одного блока, что недопустимо на производстве, и присутствует риск выхода из строя самой периферии. Для предотвращения таких ситуаций и уменьшения времени проверки был выбран метод автоматической проверки с использованием ПО. Идея заключалась в том, чтобы оператор запускал сценарий проверки, и по завершении выдавался результат УСПЕХ/ПРОВАЛ, где во втором случае указывался код ошибки в работе электронного блока и его расшифровка. После чего печатался QR-код, содержащий в себе данные об операторе, времени проверки, наименовании электронного блока и успешной или неуспешной проверке.

Основным управляющим блоком был выбран STM32F405VGT6 на 100 пинов - 32-битный микроконтроллер на базе архитектуры ARM Cortex-M от компании STMicroelectronics. Он выделяется высокой надёжностью и производительностью, имеет в своём составе большой выбор периферии, такие как АЦП, таймеры и различные интерфейсы связи [3]. Для общения между электронными блоками и микроконтроллером стенда был выбран интерфейс UART, так как изначально в блоках вся информация передаётся по нему. Связь с компьютером будет реализована с использованием UART со стороны стенда и USB со стороны компьютера через UART-USB преобразователь.

Разработка блок-схемы

Одним из основных этапов разработки печатной платы является разработка её блок-схемы, отображающей краткую информацию по всей схеме, связь между управляющим и электронными блоками, примерные шаги для реализации. Всего проверяемых блоков семь: датчик давления, датчик герметичности, предохранители, сенсорные кнопки в двух исполнениях, нагреватель и универсальный электронный блок (рисунок 1).

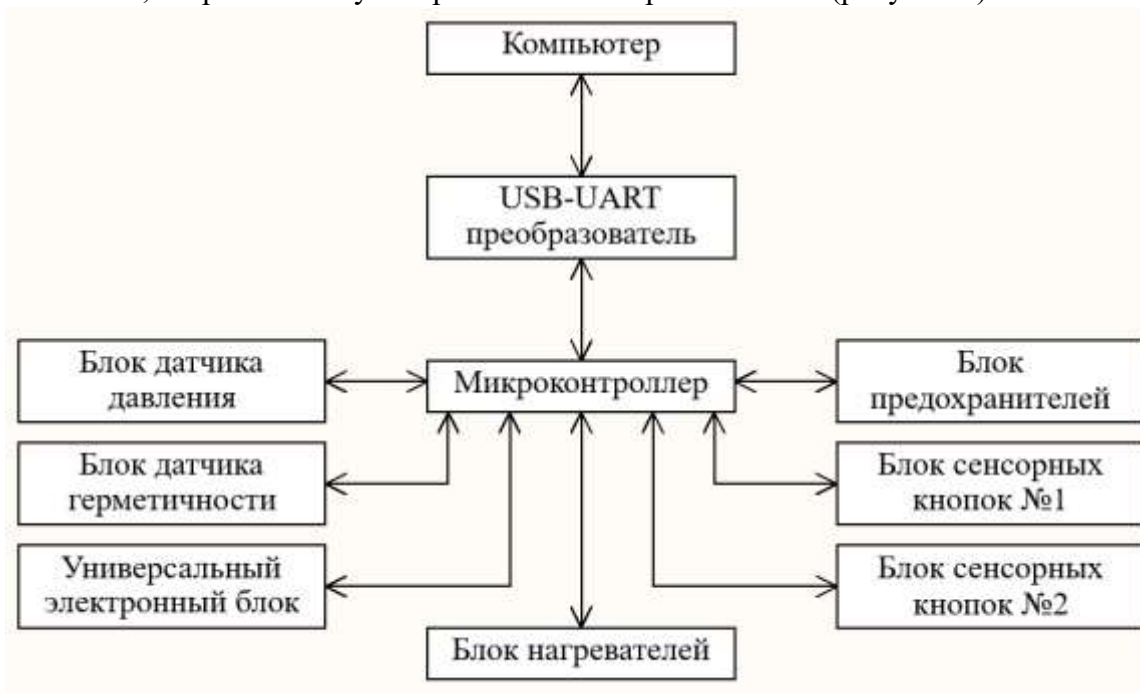


Рис. 1. Блок-схема стенда входного контроля электронных блоков

Питание

Безусловно, важнейшей частью любого устройства является питание. Все проверяемые электронные блоки, кроме блока предохранителей (на его вход подаётся сетевое напряжение ~220В), имеют на входе или 3,3В, или 5В, или 12В, или 24В, что говорит о необходимости обеспечить стенд выходами и цепями с данными напряжениями. Так как максимальное из вышеуказанных напряжений 24В, то было выбрано использовать импульсный блок питания RPS-200-24-С с выходным напряжением 24В. Данный блок питания часто используется в медицинской технике за счёт стабильного выходного напряжения, высокого КПД и качественной фильтрации входных помех и скачков напряжения. Для преобразования 24В в 12В был использован импульсный DC-DC преобразователь LM2594M-ADJ; из 12В в 5В импульсный DC-DC преобразователь BL8032CB6TR; из 5В в 3,3В стабилизатор напряжения LDL1117S33R.

Принцип подключения электронных блоков

Как упоминалось ранее, на производстве недопустимо увеличение времени входного контроля поступающих комплектующих. Подключение каждого блока кабельными сборками также является времязатратным действием, поэтому было принято решение использовать так называемые *rogopin* – электрические соединители в виде подпружиненного

штифта. Это исключит необходимость подключения каждого разъёма и возможную путаницу с кабельными сборками, а также увеличит скорость проверки каждого отдельного блока.

Результаты разработки

Из-за отсутствия строго технического задания имело место некоторая творческая составляющая разработки, присутствующая и в выборе определённых компонентов, и в идеях реализации некоторых частей схемы, и в размерах самой платы с последующим распределением компонентов на ней.

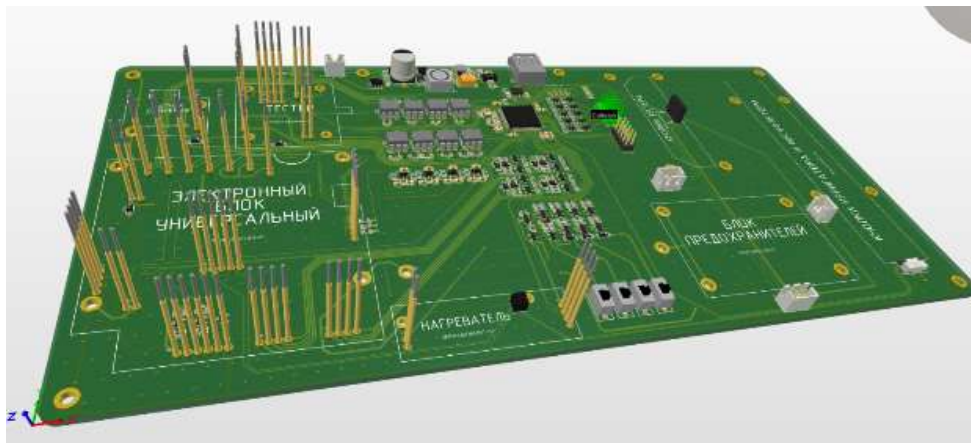


Рис. 2. 3D-модель созданной в сфере Altium Designer печатной платы станда

Список литературы

1. Басс А.В. Особенности работы с микроконтроллером STM32 // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3
2. П. Хоровиц, У.Хилл. Искусство схемотехники // Издательство БИНОМ. 2014. 704 с
3. Виды контроля на производстве // СОВРЕМЕННАЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ
4. STM32F405VGTx Datasheet // STMicroelectronics.

РЕГИСТРАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОДЛОЖКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Горляк А.Н., Дмитриева А.Н., Марков А.В., Трушлякова В.В.

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

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования структурных дефектов в полированных монокристаллических подложках 4H-SiC, выращенных модифицированным методом Лели. Показано, что совместное применение люминесцентной, поляризационной и DIC-микроскопии позволяет надёжно идентифицировать границы политипных включений, гексагональные пустоты, скопления винтовых, краевых и базисных дислокаций, малоугловые границы, микро- и макропоры, щели, царапины, углеродные включения. Достоверность оптической идентификации подтверждена методом селективного травления в расплаве KOH. Особое внимание уделено пространственным корреляциям между различными типами дефектов и их морфологической эволюции.

Ключевые слова: карбид кремния (4H-SiC), структурные дефекты, люминесцентная микроскопия, поляризационная микроскопия, DIC-микроскопия, политипные включения, дислокации

Введение

Карбид кремния привлекает внимание разработчиков силовой и высокочастотной электроники благодаря широкой запрещённой зоне, высокой электрической прочности и теплопроводности [1]. Однако коммерциализация SiC-приборов сдерживается наличием структурных дефектов, формирующихся в процессе роста монокристаллов сублимационным методом [2]. Наиболее распространённые промышленные политипы, (например, 4H и 6H) нередко срastaются в пределах одного слитка, порождая межфазные границы, которые служат источниками дислокаций, микропор и трещин [3,4]. Таким образом, неразрушающая экспресс-диагностика дефектов на стадии контроля подложек остаётся актуальной задачей.

Для точного определения политипного состава и оптических констант гексагональных политипов SiC, таких как 4H, 15R и 6H, авторами ранее была успешно применена спектральная эллипсометрия и рамановская спектроскопия. В частности, в работе [5] методом спектральной эллипсометрии была построена количественная модель диэлектрической проницаемости политипов 4H, 15R и 6H, полученных в одном ростовом процессе, а экспериментально полученные рамановские спектры позволили однозначно идентифицировать политипную принадлежность каждой области. Однако, подобные измерения требуют прецизионного оборудования и высокой однородности поверхности, а сама процедура анализа спектров и построения модели остаётся достаточно длительной, трудоёмкой, экономически неоправданной. В условиях массового контроля пластин необходимы более быстрые и доступные методики, позволяющие одновременно выявлять и классифицировать дефекты. Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Классический метод выявления выходов дислокаций — селективное травление в расплаве KOH, позволяющее по форме и размеру ямок различать TSD, TED и BPD [6]. При этом сильное легирование азотом ($n \geq 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) снижает селективность травления, и для надёжной классификации требуется дополнительное контрастирование [6]. Люминесцентная и поляризационная микроскопия могут выступать как взаимодополняющие инструменты, предоставляя информацию о распределении политипов и полях напряжений; что связано с целью настоящей работы — продемонстрировать эффективность этих методов для идентификации дефектов в полированных подложках 4H-SiC.

Методика эксперимента

Авторы исследовали монокристаллические пластины 4H-SiC n-типа, выращенные PVT-методом на C-границе (000 $\bar{1}$) с концентрацией азота $5 \times 10^{17} - 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Использовался люминесцентный микроскоп с возбуждением 360 нм, поляризационный микроскоп (режимы на просвет и на отражение) и поляризационно-интерференционный микроскоп с несколькими призмами Волластона, реализующий дифференциально-интерференционный контраст. Для подтверждения дефектов часть образцов травил в расплаве KOH при 500°C в течение 10–20 мин и повторно исследовали методами оптической микроскопии.

Результаты и обсуждение

Политипные включения и напряжения изучались следующим образом. Люминесцентная микроскопия чётко разделяет области 4H-SiC (зелёная эмиссия) и включения 6H-SiC (жёлто-оранжевая эмиссия), давая двухцветную карту политипной неоднородности. Поляризационная микроскопия в скрещённых поляризаторах на тех же участках обнаруживает сильное двулучепреломление непосредственно вдоль границ политипов, указывая на концентрацию остаточных напряжений, вызванных несоответствием решётчных параметров

[4,7]. На рисунке 1 приведено сопоставление изображений, полученных методами темнопольной оптической микроскопии и поляризационной микроскопии на просвет в окрестности границы политипов 4H/6H одной и той же области пластины SiC. Сопоставление люминесцентных и поляризационных изображений одной и той же области показывает, что области аномального двулучепреломления пространственно совпадают с изгибами и разрывами политипной границы, видимыми в люминесцентном контрасте. Именно на этих участках DIC-микроскопия выявляет скопления гексагональных пустот и дислокаций. Эти наблюдения хорошо согласуются с результатами исследования взаимодействия микропор с чужеродными политипными включениями в объёмных кристаллах SiC, где методами фотолюминесценции видимого диапазона и оптической микроскопии было подтверждено, что микропоры группируются на границах включений и коалесцируют в макропоры [3]. Таким образом, люминесцентный метод обеспечивает точную локализацию политипного включения, а поляризационный - оценку связанных с ним упругих напряжений; их совместное применение позволяет прогнозировать зоны риска образования вторичных дефектов.

Сравнение изображений одних и тех же участков до и после КОН-травления показало, что фигуры травления в форме мелких овалов соответствуют BPD, а более крупные гексагональные и каплевидные ямки - TED и TSD соответственно; наличие чёрной полوى сердцевинь внутри ямки однозначно маркирует микропору, что хорошо согласуется с литературой [6]. DIC-микроскопия существенно улучшила дифференциацию TSD и TED на протравленных образцах, особенно при высоком уровне легирования, когда стандартное оптическое наблюдение даёт слабый контраст. Этот результат согласуется с данными [6] о том, что для высоколегированных n-типа образцов размер гексагональных ямок травления перестаёт коррелировать с типом прорастающих дислокаций, и для их идентификации требуются дополнительные исследования.

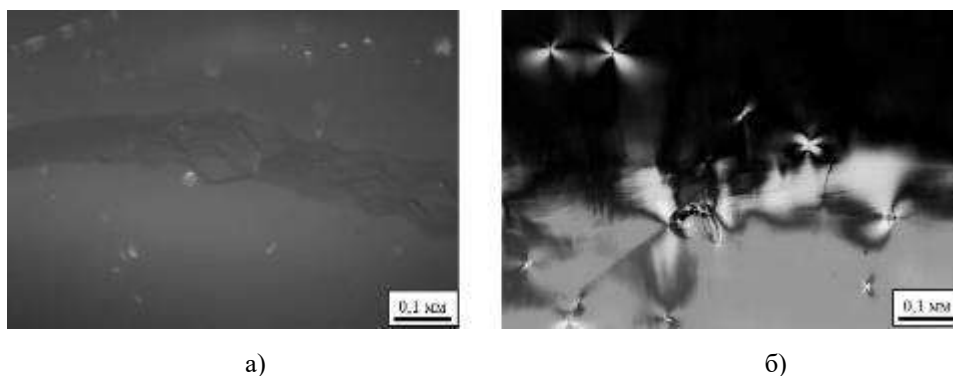


Рис. 1. Изображение окрестности границы политипов 4H/6H одной и той же области пластины SiC: а) темнопольная оптическая микроскопия с комбинированным осветителем; б) поляризационная микроскопия на просвет

Сопоставление люминесцентного и поляризационного методов на непротравленных образцах показало, что люминесценция может косвенно указывать на скопления дислокаций благодаря изменению интенсивности эмиссии в деформированной области, тогда как поляризационный контраст непосредственно выявляет поля напряжений вокруг дислокаций и малоугловых границ. Малоугловые границы (LAGB), состоящие преимущественно из рядов TED и BPD, проявляются в поляризованном свете особенно ярко; при вращении образца наблюдается периодическое изменение интерференционной окраски, характерное

для наклонно-развернутых границ [7]. Совпадение положения LAGB на поляризационных снимках и цепочек ямок травления после травления в КОН доказывает, что поляризационная микроскопия способна неинвазивно выявлять эти места локализации напряжений, тогда как люминесцентная визуализация тех же границ менее контрастна и требует дополнительной обработки изображений (рисунок 2).

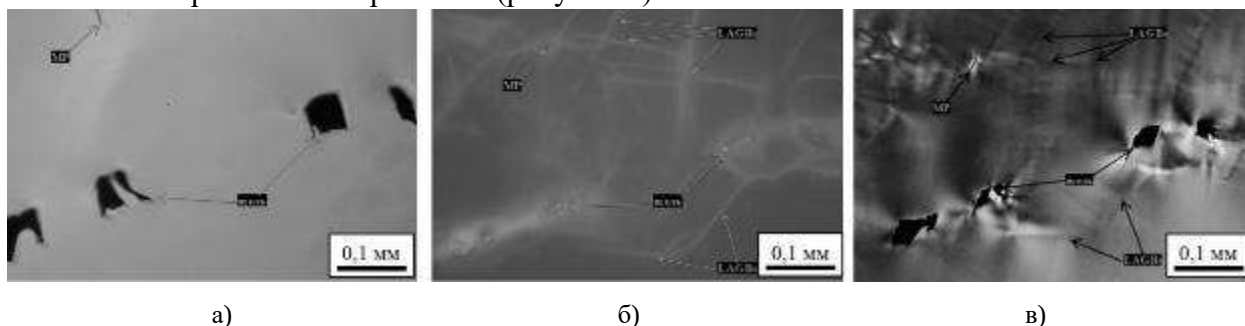


Рис. 2. Изображения одной и той же области пластины SiC, полученные различными методами: а) темнопольная оптическая микроскопия на просвет с осветителем белого света; б) люминесцентная микроскопия при УФ возбуждении 360 нм; в) поляризационная микроскопия на просвет

С целью анализа морфологии и корреляции дефектов были использованы комбинированные методы. Поляризационная микроскопия на просвет и на отражение позволила детально визуализировать пространственную эволюцию микро- и макропор. Авторами зафиксирована коалесценция двух соседних микропор с образованием макропоры, которая затем трансформируется в щелевидную полость. Интерференционные картины вокруг таких полостей указывают на локальные поля напряжений, способствующие движению пор вдоль температурного градиента. Таким образом, данный метод является эффективным инструментом для изучения полей деформаций вокруг полых макродефектов в пластинах SiC, а характер интерференционной картины несёт информацию о типе и величине напряжений. DIC-изображения демонстрируют ступени роста на внутренней стороне стенок пустот, ориентация которых подтверждает смещение пор к более горячему фронту кристаллизации.

Прямое сравнение люминесцентного и поляризационного снимков одних и тех же полостей показало, что метод люминесцентной микроскопии обеспечивает высокий контраст между материалом и пустотой (чёрная область на светящемся фоне); метод поляризационной микроскопии добавляет информацию о напряжённом состоянии материала вокруг пустоты. Это особенно актуально для оценки устойчивости подложки к растрескиванию.

Заключение

Комплексная оптическая диагностика, объединяющая люминесцентную, поляризационную и DIC-микроскопию, обеспечивает надёжную неразрушающую идентификацию основных типов структурных дефектов в полированных подложках 4H-SiC. В отличие от прецизионных, но трудоёмких методов спектральной эллипсометрии и рамановской спектроскопии, детально характеризующих политипный состав и оптические константы [5], предлагаемый подход ориентирован на экспрессный контроль качества непосредственно в процессе производства. Прямое сопоставление люминесцентных и поляризационных изображений одних и тех же областей показало, что люминесцентный контраст в первую очередь чувствителен к политипному составу, а поляризационный - к полям упругих

напряжений. Совместное применение методов люминесцентной и поляризационной микроскопии позволяет выявлять корреляцию между политипными границами, концентрацией напряжений и генерацией вторичных дефектов. Поляризационный контраст также незаменим для неразрушающего обнаружения малоугловых границ и оценки напряжений вокруг пор. Дополнение этих методов DIC-микроскопией и селективным травлением в КОН существенно повышает достоверность определения дислокаций, особенно в сильно легированных образцах.

Список литературы

1. Matsunami H. Technological breakthroughs in growth control of silicon carbide for high power electronic devices // Jpn. J. Appl. Phys, 2004, Vol.43, No.10, p. 6835–6847.
2. Tairov Y.M., Tsvetkov V.F. Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystals // J. Cryst. Growth, 1978, Vol. 43, Iss. 2, p. 209–212.
3. Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Argunova T.S., Yi J.M., Kim M.U., Je J.H., Nagalyuk S.S., Mokhov E.N., Margaritondo G., Hwu Y. Interaction of micropipes with foreign polytype inclusions in SiC // J. Appl. Phys. 2006, Vol. 100, 093518.
4. Rost H.-J., Doerschel J., Irmscher K., Schulz D., Siche D. Influence of nitrogen doping on the properties of 4H-SiC single crystals grown by physical vapor transport // J. Cryst. Growth, 2003. Vol. 257, p. 75–83.
5. Авров Д.Д., Горляк А.Н., Лебедев А.О., Лучинин В.В., Марков А.В., Осипов А.В., Панов М.Ф., Кукушкин С.А. Сравнительный эллипсометрический анализ политипов карбида кремния 4Н, 15R, 6Н, полученных модифицированным методом Лели в одном ростовом процессе // Письма в Журнал технической физики, 2020, Т. 46, вып. 19. с. 29–32.
6. Kallinger B., Polster S., Berwian P., Friedrich J., Müller G., Danilewsky A.N., Wehrhahn A., Weber A.-D. Threading dislocations in n- and p-type 4H-SiC material analyzed by etching and synchrotron X-ray topography // J. Cryst. Growth, 2011, Vol. 314, Iss. 1, p. 21–29.
7. Xu H., Gao Y., Peng Y., Jiang K., Song S., Hu X., Xu X. The stress birefringence images of low angle grain boundaries in 6H-SiC single crystals // Cryst. Res. Technol, 2012, Vol. 47, No. 6, p. 603–609.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ И РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ЧИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Добрынин И.А.¹, Гостева Е.А.².

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Аннотация. Рассмотрена проблема чистоты поверхности дентальных имплантатов. Показано, что традиционные методы обработки обеспечивают рабочую морфологию, но могут сопровождаться загрязнением поверхности. Сделан вывод о необходимости разработки технологий, позволяющих сохранять требуемую структуру при более высокой химической чистоте.

Ключевые слова: дентальные имплантаты, лазерная обработка, поверхность имплантата, морфология поверхности, элементный состав, загрязнение поверхности, первичная стабильность

Дентальная имплантация в настоящее время является одним из наиболее предсказуемых методов восстановления зубного ряда. Вместе с тем успех имплантации определяется не только материалом имплантата и его макродизайном, но и состоянием поверхности, поскольку именно она первой вступает во взаимодействие с тканями организма. В современной имплантологии поверхность традиционно рассматривается через её морфологию, прежде всего через параметры микро- и наношероховатости. Однако накопленные данные показывают, что для оценки качества имплантационной поверхности этого уже недостаточно.

Традиционные методы обработки, такие как пескоструйная обработка, кислотное травление, комбинированные SLA-подобные технологии и электрохимические методы, позволяют получать развитый рельеф, благоприятный для раннего костного ответа. Одновременно с этим именно такие технологии могут быть связаны с появлением остаточных частиц абразива, следов химических реагентов, продуктов реакции и других примесей технологического происхождения. Следовательно, проблема качества поверхности должна ставиться шире: не только как задача формирования заданной морфологии, но и как задача обеспечения её химической чистоты.

Целью данной работы является анализ морфологии и элементного состава поверхностей дентальных имплантатов и обоснование чистоты поверхности как самостоятельного критерия совершенствования технологий их обработки.

В работе были проанализированы новые стерильные дентальные имплантаты различных систем, официально представленных на российском рынке. Для каждого образца оценивали морфологию поверхности и элементный состав поверхностной области. Морфологический анализ выполняли методом сканирующей электронной микроскопии, что позволяло оценивать состояние микропор, выраженность рельефа, наличие локальных дефектов и непротравленных участков. Элементный состав анализировали методом рентгенофлуоресцентного анализа, который использовали для выявления основных элементов, легирующих компонентов и примесей.

Для интерпретации полученных результатов дополнительно использовали данные по торку установки и первичной стабильности имплантатов, позволяющие оценить, приводит ли изменение микроморфологии поверхности к заметному функциональному выигрышу.

Проведённый анализ показал, что большинство исследованных имплантатов различных систем имеют в целом сходную поверхность, которую можно охарактеризовать как наногладкую и микропористую. Различия между системами выявлялись преимущественно в степени выраженности микропор, распределении элементов рельефа по высоте и наличии локальных непротравленных участков. Таким образом, современные технологии обработки в значительной степени уже воспроизводят общий рабочий тип поверхности, благоприятной для остеоинтеграции.

В то же время элементный анализ показал, что поверхностная область имплантатов не является полностью химически однородной. Наряду с титаном и легирующими компонентами, характерными для используемых сплавов, были выявлены примеси и посторонние элементы, которые нельзя свести только к составу материала матрицы. Это свидетельствует о том, что на качество поверхности существенно влияют именно этапы технологической обработки.

Полученные результаты позволяют сделать принципиально важный вывод: при сходстве морфологии химическое состояние поверхности может заметно различаться. Иными словами, рельеф поверхности в современных системах уже во многом стандартизирован, тогда как её чистота остаётся переменной характеристикой. Именно поэтому сравнение имплантационных систем только по морфологическим признакам оказывается недостаточным.

Сопоставление этих данных с результатами оценки первичной стабильности показывает, что изменение микрошероховатости поверхности в пределах рабочего диапазона не приводит к принципиальному улучшению функциональных показателей. При разных ва-

риантах поверхности удаётся получить сопоставимый уровень торка установки и первичной стабильности. Следовательно, дальнейшее усложнение микрорельефа не может рассматриваться как главный путь совершенствования имплантационных систем.

На этом фоне проблема чистоты поверхности приобретает самостоятельное значение. Если рабочая морфология уже может быть достигнута различными методами, то основным резервом развития становится переход к технологиям, позволяющим формировать поверхность с минимальным количеством остаточных загрязнений. В таком случае преимущество новой технологии должно определяться не только морфологией, но и тем, насколько чистым остаётся поверхностный слой после завершения обработки.

Показано, что современные методы обработки дентальных имплантатов в большинстве случаев обеспечивают сходную по функциональному значению морфологию поверхности. При этом различия в микроморфологии не приводят к принципиальному улучшению показателей первичной стабильности. Одновременно установлено, что поверхность имплантатов может содержать остаточные примеси и признаки технологического загрязнения, что делает чистоту поверхности важным самостоятельным критерием её качества. На основании полученных данных сделан вывод о необходимости смещения акцента в разработке новых технологий обработки: от дальнейшего усложнения рельефа к формированию более чистой поверхности при сохранении требуемой морфологии.

Список литературы

1. Le Guéhennec L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration // *Dental Materials*. 2007. Vol. 23, № 7. P. 844–854.2.
2. Dhaliwal J.S., Abdullat E.M., Randall D.R., Emami E., Tarnow D.P. Surface contamination of titanium dental implants: a narrative review // *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2020. Vol. 22, № 4. P. 390–399.
3. Dohan Ehrenfest D.M., Coelho P.G., Kang B.S., Sul Y.T., Albrektsson T. Classification of osseointegrated implant surfaces: materials, chemistry and topography // *Trends in Biotechnology*. 2010. Vol. 28, № 4. P. 198–206.
4. Kolarovszki B., Ficsor S., Frank D., Katona K., Soos B., Turzo K. Unlocking the potential: laser surface modifications for titanium dental implants // *Lasers in Medical Science*. 2024. Vol. 39. Art. 162.
5. Gosteva E.A., Dymnikov A.B., Laktionov A.A., Shcherbakov K.A., Tselikov D.I., Grafova A.S., Mamonov D.N., Lunev I.V., Klimentov S.M., Sergienko D.D., Fedorova V.V. Формирование биосовместимой поверхности дентальных имплантов с помощью лазерной обработки.

ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ZrO_2 - HfO_2 - Y_2O_3 - Eu_2O_3 - Nd_2O_3

ЕГОРОВА У.С.^{1,2}

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

В.И.Ульянова (Ленина)

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

Аннотация. В работе исследованы нанокристаллические порошки циркониево-гафниево-иттриевой системы, стабилизированной иттрием и активированной европием и неодимом, полученные методом соосаждения. Основное внимание уделено влиянию параметров синтеза, включая нагрев, перемешивание и условия старения осадков, на фазовый состав и размеры кристаллитов. Установлено формирование кубической фазы во всех исследованных случаях. Определено, что условия старения и механическая обработка существенно влияют на размеры области когерентного рассеяния (ОКР). Наиболее выраженное уменьшение размеров кристаллитов достигнуто при сочетании нагрева и перемешивания на стадии старения, что позволило сократить их размер с 17 до 7 нм. Полученные результаты подтверждают возможность направленного управления структурными характеристиками материала для создания высокотемпературной и люминесцентной керамики с заданными свойствами.

Ключевые слова: цирконий-гафниева керамика, стабилизированный диоксид циркония, соосаждение, иттрий, европий, неодим, люминесцентная керамика, нанокристаллы, рентгенофазовый анализ, область когерентного рассеяния.

Введение

Материалы на основе ZrO_2 и HfO_2 обладают уникальным сочетанием высоких температур плавления ($>2700^\circ C$), химической стойкости, низкой теплопроводности и высокой прочности. Однако, в зависимости от температуры система оксидов на основе циркония и гафния имеет одну из трех основных кристаллических решеток: моноклинную (m), тетрагональную (t) или кубическую (c) [0]. Моноклинная фаза существует при комнатной температуре и является термодинамически стабильной. Тетрагональная фаза стабильна в диапазоне температур от 1400 до 2570 К, при температурах ниже может спонтанно превращаться в моноклинную. При более высоких температурах цирконий-гафниева система переходит в кубическую фазу. Для сохранения кубической кристаллической решетки оксидов при комнатных температурах их следует стабилизировать. Для этого применяются оксиды – стабилизаторы, которые гетеровалентно замещают цирконий (гафний), устраняя дисторсию кислородной решетки, и предотвращает переход в тетрагональную или моноклинную фазу. От количества добавленного стабилизатора зависит полученная фаза. Так, например, для получения кубической кристаллической решетки необходимо 8-20 мол.% трехвалентных или двухвалентных ионов [0]. Система оксидов на основе циркония и гафния, стабилизированных иттрием, представляет собой перспективную основу для создания высокотемпературной керамики. Дополнительное легирование оксидами европия и неодима позволяет расширить функциональные свойства материала за счет формирования люминесцентной керамики.

Свойства керамики сильно зависят от размера кристаллитов (областей когерентного рассеяния), который, в свою очередь, определяется параметрами синтеза. Соосаждение из водных растворов является технологичным и масштабируемым подходом, однако роль параметров старения осадка (нагрев, перемешивание, старение без воздействия) остаётся недостаточно изученной

Экспериментальная часть

В рамках исследования была синтезирована серия образцов методом соосаждения с варьированием технологических параметров, включая условия нагрева, перемешивания растворов и продолжительность старения осадков. Для синтеза использовали водные растворы солей $HfOCl_2$, $Zr(NO_3)_4$, $Y(NO_3)_3$, $Eu(NO_3)_3$, $Nd(NO_3)_3$ с концентрациями 3,78; 2,75; 5,15; 8,51 и 2,4 г/100 мл соответственно. Расчетные объемы исходных растворов смешивали в течение 30 минут, после чего проводили обратное покапельное осаждение в систему, содержащую 200 мл 20%-ного раствора аммиака и 100 мл дистиллированной воды. Введение каждого раствора осуществлялось в течение 7 минут.

Были исследованы четыре варианта старения осадков:

1. Только нагрев;
2. Только перемешивание;
3. Одновременный нагрев и перемешивание;
4. Самостоятельное старение без внешнего воздействия.

Для образцов с нагревом старение проводилось при температуре до $60^\circ C$ в течение 25 минут, без нагрева — 60 минут.

После синтеза осадки сушили в течение 24 часов. Далее каждый образец разделяли на две части: первая часть подвергалась перетиранию до прокалки, вторая — после прокалки.

Прокаливание осуществляли при нагреве от 20 °С до 600 °С за 90 минут с последующей выдержкой при 600 °С в течение 1 часа.

Результаты и обсуждения

Всего было получено 8 экспериментальных образцов. Проведенный рентгенофазовый анализ подтвердил формирование кубической фазы циркониево-гафниевой системы во всех случаях (Рис.1). Также были рассчитаны значения областей когерентного рассеяния (ОКР), продемонстрировавшие существенные различия в размерах кристаллитов в зависимости от условий синтеза (Табл.1).

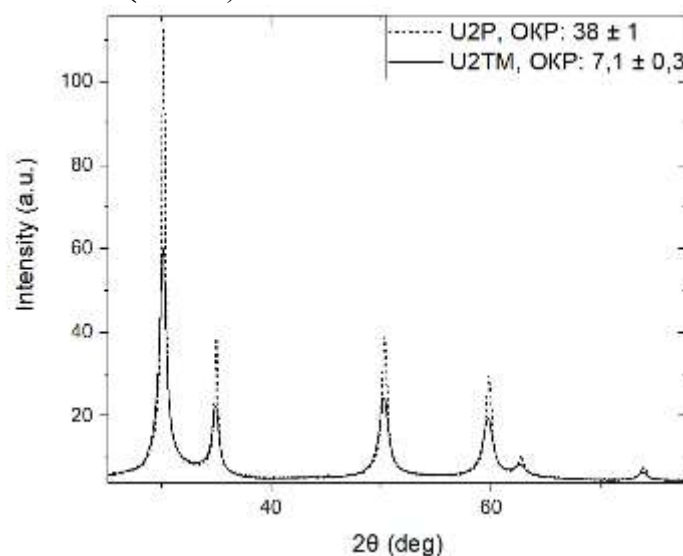


Рис. 1. Кривые XRD для образцов с наибольшим (U2P) и наименьшим (U2TM) размерами областей когерентного рассеяния

Установлено, что предварительное перетирание после сушки способствует формированию более крупных кристаллитов по сравнению с образцами, не подвергавшимся данной обработке. Наиболее эффективным методом уменьшения размеров кристаллов оказалось сочетание нагрева и перемешивания на стадии старения, что позволило снизить размер кристаллитов с 17 до 7 нм.

Таблица 1

Размеры ОКР образцов,

Т – нагрев, М - перемешивание, Р – образцы, перетертые до проковки

	Т	М	Р	ОКР, нм
U2	-	-	-	17,7 ± 0,4
U2	-	-	+	38 ± 1
U2	-	+	-	16,0 ± 0,3
U2	-	+	+	20,7 ± 0,6
U2	+	-	-	10 ± 2
U2	+	-	+	13,4 ± 0,2
U2	+	+	-	7,1 ± 0,3
U2	+	+	+	14,0 ± 0,3

Заключение

Полученные результаты демонстрируют высокую значимость параметров синтеза для управления структурными характеристиками стабилизированной циркониево-гафниевой

керамики, что открывает возможности целенаправленного регулирования свойств материала для высокотемпературных и функциональных люминесцентных применений.

Список литературы

1. Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В., Коренков В.В., Тюрин А.И., Родаев В.В., Дьячек Т.А. К-36 Керамические материалы на основе диоксида циркония / Под общ. ред. Ю.И. Головина. – Москва: Техносфера, 2018. – 358 с. – ISBN 978-5-94836-529-9.
2. Dementeva E.V., Shakirova A.A., Orekhova K.N., Popova T.B., Yagovkina M.A., Lihachev A.I., Dementev P.A., Venevtsev I.D., Zatsepin A.F., Koshelev D.S., Utochnikova V.V., Burakov B.E., Zamoryanskaya M.V. Structural and luminescent properties of YSZ-YSH based ceramics depending on Zr/Hf ratio // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 1007 – Art. 176452 – DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.176452

СОЗДАНИЕ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЁНОК CsPbI_2Br , ЛЕГИРОВАННЫХ ХЛОРИДОМ ЦЕЗИЯ, В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

ЖАРАВИН М.А., ТАРАСОВ А.С., ИСАЕВ Ю.Е., ДЕГТЕРЕВ А.Э.

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

Аннотация. Работа посвящена созданию и исследованию тонких пленок неорганического перовскита CsPbI_2Br , легированного хлоридом цезия, в условиях атмосферы. Добавка CsCl в количестве 8 мг/мл помогает сформировать стабильную α -фазу с максимумом фотолюминесценции на длине волны 650 нм. Модификация параметров центрифугирования и отжига позволила уменьшить количество дефектов в созданных пленках и повысить их стабильность в течение 400 часов.

Ключевые слова: перовскит, хлорид цезия, антирастворитель, фотолюминесценция.

В последние годы галогенидные перовскиты привлекают огромное внимание исследователей благодаря своим оптоэлектронным свойствам и низкой стоимости изготовления. Однако органические или неорганические перовскиты (например, MAPbI_3) быстро деградируют под действием влаги, кислорода и тепла. Замена органических катионов на неорганический Cs^+ позволяет повысить термостабильность материала, но при этом возникает проблема фазовой нестабильности, переход из чёрной α -фазы в жёлтую δ -фазу [1,2]. Частичное замещение йода бромом улучшает устойчивость, но не решает её полностью.

Легирование хлором эффективно подавляет миграцию ионов и фазовое расслоение [3]. В данной работе исследовано влияние CsCl , типа антирастворителя и режимов термической обработки на качество плёнок CsPbI_2Br , получаемых в атмосферных условиях.

Исходные реактивы (CsI , PbI_2 , PbBr_2 , CsCl) растворяли в смеси диметилсульфоксида (DMSO) и диметилформамида (DMF) в объёмном соотношении 4:1. Концентрация CsCl 8 мг/мл. Плёнки наносили на стеклянные подложки методом центрифугирования (3000 об/мин, 40 с). Термическую обработку проводили в два этапа: сушка при 120°C (3 мин) и отжиг при 250°C (10 мин). Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали при возбуждении лазером 405 нм.

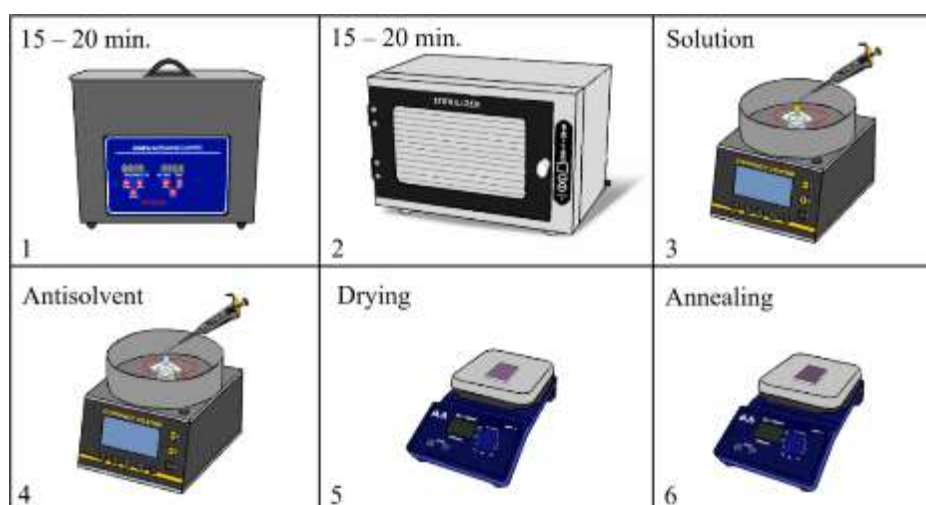


Рис. 1. Этапы изготовления плёнок перовскита

Введение CsCl (8 мг/мл) приводит к сдвигу максимума ФЛ в область 648-651 нм по сравнению с 630-635 нм для нелегированного CsPbI₂Br, что свидетельствует о частичном замещении галогенов и стабилизации решётки. При концентрации 8 мг/мл интенсивность ФЛ возрастает с 3000 до 10 500 усл. ед. (при использовании этилацетата (ЕА)). Образцы с 8 мг/мл CsCl и антирастворителем хлорбензол (СВ) демонстрируют начальную интенсивность до 13 000 усл. ед. Но образцы с ЕА могут сохранять >80% интенсивности после 400 ч. хранения на воздухе.



Рис. 2. Деградация плёнки с течением времени

Сравнение ЕА, СВ и изопропанола (ІРА) показало, что максимальное качество плёнок (сплошное покрытие, высокая интенсивность ФЛ) достигается при использовании СВ. Плёнки, полученные без антирастворителя, имели неполное покрытие и интенсивность ФЛ на порядок ниже. Хлорбензол обеспечивает быстрое локальное перенасыщение, что способствует гомогенной нуклеации и формированию плотной бездефектной структуры.

Далее были исследованы комбинации сушка/отжиг: 100/230, 120/230, 100/250, 120/250°C. Наилучшие результаты (начальная интенсивность 15 950 усл. ед., стабилизированная 10 250 усл. ед., время стабилизации 20 с.) получены для режима 100°C / 250°C при двухстадийном центрифугировании (1000 и 4000 об/мин). Повышение температуры отжига до 250°C необходимо для полного удаления остаточного DMSO и завершения кристаллизации α-фазы.

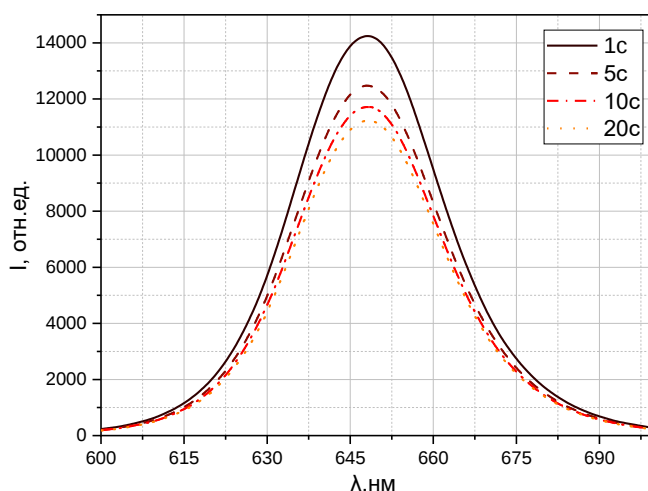


Рис. 3. Временная характеристика ФЛ одного из изготовленных образцов

Таким образом, был разработан метод получения стабильных тонких плёнок $\text{CsPbI}_2\text{Br}:\text{CsCl}$ в атмосферных условиях, содержащих кислород и пары воды. Оптимальные параметры синтеза: растворитель – смесь DMSO:DMF (4:1), антирастворитель – СВ, концентрация CsCl – 8 мг/мл, термическая обработка $100^\circ\text{C}/250^\circ\text{C}$. Показано, что введение хлорида цезия подавляет фазовое расслоение и увеличивает стабильность плёнок, что доказывается сохранением $>80\%$ интенсивности после нахождения более чем, 400 ч. в условиях атмосферы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке недорогих и долговечных фотоэлектрических устройств на основе неорганических перовскитов.

Список литературы

1. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I. et al. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX_3 , $X = \text{Cl, Br, and I}$): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut // *Nano Lett.* 2015. V. 15. P. 3692–3696.
2. Beal R.E., Slotcavage D.J., Leijtens T. et al. Cesium Lead Halide Perovskites with Improved Stability for Tandem Solar Cells // *J. Phys. Chem. Lett.* 2016. V. 7. P. 746–751.
3. Jung J.W., et al. CsCl-assisted defect control in CsPbI_2Br films. 2020.
4. Choubey A., Perumal N., Muthu S.P. et al. Ambient-air fabrication of efficient and stable carbon-based inorganic perovskite solar cell based on CsPbI_2Br film via organic salt passivation // *Sol. Energy.* 2022. V. 245. P. 265–277.

ПОЛУЧЕНИЕ И АСМ ДИАГНОСТИКА МЕМБРАН НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

ЗВАНКОВИЧ Н.К., СОКОЛОВ А.М., МУРАТОВА Е.Н.,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. В статье представлен метод электрохимического анодирования для формирования наноструктурированных мембран пористого анодного оксида алюминия. Приведены результаты синтеза серии образцов при различных напряжениях и времени травления. Методами атомно-силовой микроскопии исследована морфология поверхности, установлены геометрические параметры пор. Показано, что диаметр пор составляет в среднем от 70 до 100 нм, структура обладает высокой упорядоченностью.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, электрохимическое травление, наноструктуры, атомно-силовая микроскопия, самоорганизация.

Введение

Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА) представляет собой востребованный наноструктурированный материал, так как имеет регулярную упорядоченную систему пор. Химическая и механическая стабильность мембран ПАОА делает их конкурентно-способными кандидатами для использования в качестве шаблонов для синтеза наночастиц, в сенсорных устройствах, например газовых фильтрах, и каталитических системах [1, 2]. Большая удельная поверхность и возможность точного контроля диаметра пор (от 10 до 300 нм) открывают перспективы как для адресной доставки лекарств, так и для создания новых приборов нанoeлектроники [3, 4]. Электрохимическое анодирование является технологически простым и экономически эффективным методом получения самоорганизованных оксидных структур. Основными параметрами, определяющими функциональные свойства мембран, выступают диаметр пор, межпоровое расстояние и степень упорядоченности [5, 6].

Цель настоящей работы – синтез мембран ПАОА с контролируемой морфологией и исследование поверхностной структуры с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Физико-химические основы процесса анодного окисления

При анодном окислении алюминия в электролите на поверхности металла формируется оксидная плёнка Al_2O_3 . В зависимости от состава электролита может образовываться либо барьерный оксид (в нейтральных средах), либо пористый (в кислых – щавелевая, серная, фосфорная кислоты). Формирование пористой структуры происходит в результате конкуренции между процессами электрохимического растворения оксида и его роста. На начальной стадии поры возникают хаотично, но с течением времени и при оптимальных режимах (напряжение, температура, концентрация) происходит самоорганизация ячеек в гексагональную решётку.

Эксперимент

Синтез мембран ПАОА осуществлялся методом электрохимического травления в вертикальной ячейке прижимного типа. Исходным материалом служила алюминиевая фольга толщиной 0,1 мм. Перед анодированием фольга последовательно очищалась в ацетоне, изопропиловом спирте и дистиллированной воде.

Электрохимическое травление было проведено в 0,3М растворе щавелевой кислоты ($C_2H_2O_4$) при постоянном напряжении 90–100 В и ограничении тока 0,2 А. Для поддержания стабильной температуры ячейку предварительно охлаждали в морозильной камере (25 мин), в процессе анодирования осуществлялось активное перемешивание электролита. Длительность процесса составила от 30 до 60 минут. После завершения анодирования остаточный алюминий удалялся химическим травлением в пересыщенном растворе хлорида меди ($CuCl_2$). Условия синтеза шести образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Образец	Время анодирования, мин	Ток, А	Напряжение, В
1	30	0,2	95
2	43		95
3	56		95
4	43		100
5	35		90
6	50		95

Результаты и обсуждение

В результате синтеза получены полупрозрачные мембраны ПАОА диаметром порядка 1,5 см. На рис. 1 представлены фотографии образцов, демонстрирующие изменение внешнего вида при увеличении времени анодирования (от 30 до 56 мин). При напряжении 100 В (образец г на рис.2) наблюдались локальные пробои оксидного слоя.

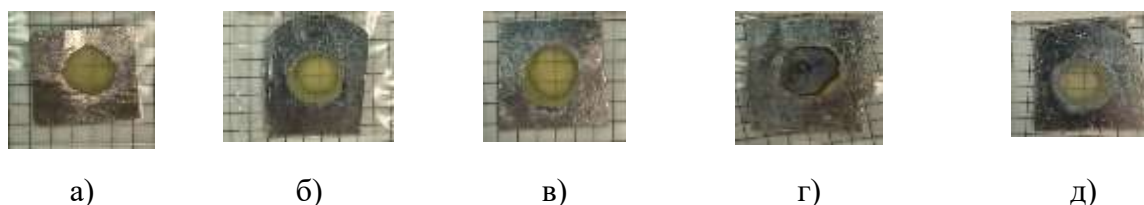


Рис. 1. Фотографии образцов ПАОА, синтезированных в щавелевой кислоте при различных режимах: а – 30 мин (95 В); б – 43 мин (95 В); в – 56 мин (95 В); г – 43 мин (100 В); д – 35 мин (90 В)

Атомно-силовая микроскопия

Для анализа морфологии и количественной оценки размера пор использовался атомно-силовой микроскоп в полуконтактном режиме. Сканирование проводилось на участках размером 3×3 мкм с разрешением 256×256 точек. На рис. 2 представлены АСМ-изображения рельефа поверхности образцов. Для образца №4, исследование поверхности не проводилось из-за разрушения мембраны.

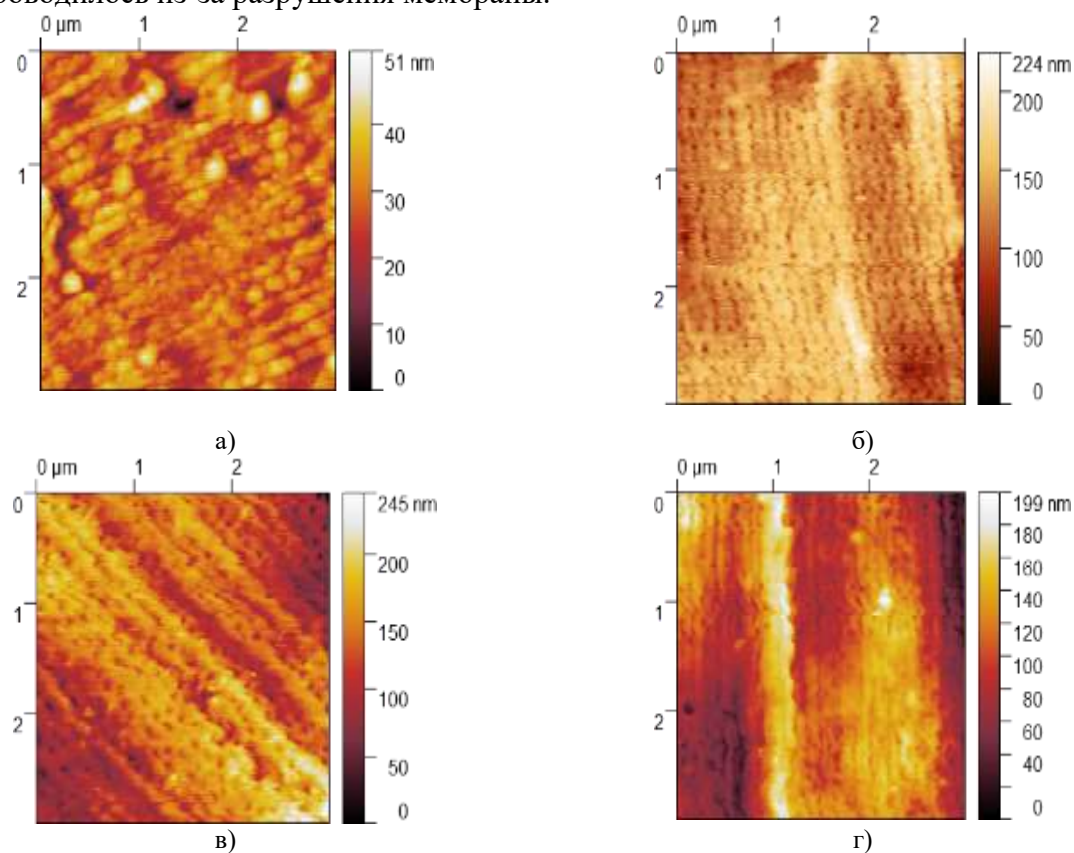


Рис. 2. АСМ изображения образцов ПАОА, синтезированных в щавелевой кислоте при различных режимах: а – 30 мин (95 В); б – 43 мин (95 В); в – 56 мин (95 В); г – 35 мин (90 В)

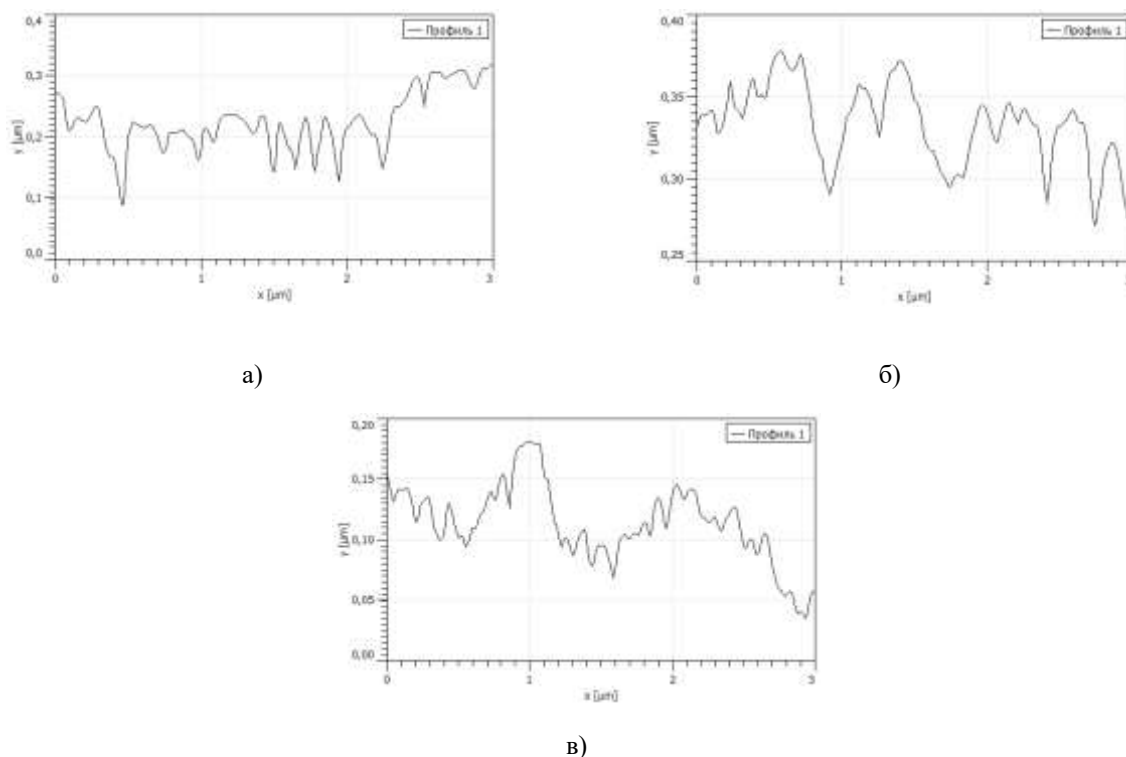


Рис. 3 АСМ изображения профилей распределения высот образцов ПАОА, синтезированных в щавелевой кислоте при различных режимах: а – 43 мин (95 В); б – 56 мин (95 В); в – 35 мин (90 В)

Анализ профилей поперечного сечения (рис. 3) подтвердил, что форма пор близка к цилиндрической, а средний диаметр пор составляет от 70 нм (до 100 нм). Таким образом, АСМ является эффективным методом неразрушающего контроля качества мембран ПАОА, позволяющим и оптимизировать режимы синтеза.

Заключение

В ходе работы успешно синтезирована серия мембран пористого анодного оксида алюминия с использованием двухстадийного электрохимического анодирования. Методами АСМ подтверждено формирование нанопор диаметром ~100 нм с гексагональной упаковкой. Показано, что увеличение напряжения до 100 В приводит к пробое оксидного слоя, а малое время анодирования (30 мин) недостаточно для формирования упорядоченной системы пор, что чётко регистрируется атомно-силовой микроскопией.

Список литературы

1. Eessaa A. K., El-Shamy A. M. Review on fabrication, characterization, and applications of porous anodic aluminum oxide films with tunable pore sizes for emerging technologies // *Microelectronic Engineering*. 2023. Т. 279. С. 112061. DOI: 10.1016/j.mee.2023.112061.
2. Manzoor S., Ashraf M. W., Shahzadi T., Tariq M. I., Hossain M. K. Recent Progress of Fabrication, Characterization, and Applications of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane: A Review // *CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2023. Т. 135. № 2. С. 1007–1052. DOI: 10.32604/cmescs.2022.022093.
3. Соколов А. М., Никитин М. С., Муратова Е. Н. Получение и применение наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия // XIII научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего». Санкт-Петербург, 15–17 мая 2025. Т. 3. С. 185–189.
4. Соколов А. М., Муратова Е. Н. Особенности формирования и области применения наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия // Научно-практическая конференция «Гириконд Экспо». Санкт-Петербург, 6 октября 2025.

5. Муратова Е. Н., Лучинин В. В., Мошников В. А. и др. Особенности формирования свободных наноразмерных пористых мембран оксида алюминия из фольги и новые области применения // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43. № 2. С. 207–215.
6. Muratova E., Kozodaev D., Tyulagin P. Effect of Aluminum Foil Polishing on the Morphology of Membranes Based on Porous Anodic Aluminum Oxide // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2025. P. 1017–1019.
7. Muratova E. N., Ponomareva A. A., Shemukhin A. A., Balakshin Y. V., Evseev A. P., Moshnikov V. A., Zhilenkov A. A., Kichigina O. Y. The Influence of the Structural Parameters of Nanoporous Alumina Matrices on Optical Properties // Metals. 2024. Т. 14. № 6. С. 651. DOI: 10.3390/met14060651.
8. Muratova E., Kozodaev D., Bobkov A., Mesh M., Moshnikov V. Technology of formation and new areas of application of composite metastructures based on aluminum oxide // The 15th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2025). Malaga, Spain, July 22–25, 2025. P. 1110.

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

ИВАНОВА С.А., ПЩЕЛКО Н.С.

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

Аннотация. В работе показано, что из пленок цинка толщиной 1 мкм, нанесенных на стеклянные подложки, в результате совместного действия повышенной температуры и электрического поля, приложенного перпендикулярно поверхности образца, возможно получение оксида цинка с развитой поверхностью, состоящей из одномерных монокристаллов нанометровых размеров. Методом сканирующей электронной микроскопии была исследована морфология поверхности всех пленок. Показано, что локализованное вблизи поверхности пленки цинка электрическое поле способствует получению пленок его оксида с развитой поверхностью, состоящей из одномерных нанометровых монокристаллов.

Ключевые слова: электрическое поле, адгезия, проводящие пленки, оксид цинка, поверхность, структура.

Введение

В микро- и нанoeлектронике для электропроводящих и полупроводящих пленок необходимо регулировать ключевые характеристики в процессе их получения, чтобы оптимизировать работу изготавливаемых устройств - транзисторов, сенсоров, солнечных элементов и др. Правильно подобранные параметры пленок позволяют добиться требуемой производительности, стабильности и миниатюризации. Для металлических пленок регулируют удельное электрическое сопротивление (проводимость), чтобы контролировать ток и потери энергии. Важно также изменять адгезию к подложке и морфологию поверхности (размер зерен, шероховатость) для повышения надежности и предотвращения отслоений. Оптические свойства, такие как прозрачность, влияют на применение в прозрачных электродах. В полупроводниковых пленках контролируют ширину запрещенной зоны и подвижность носителей заряда для настройки пороговых напряжений и скорости переключения. Поверхностное сопротивление и концентрацию дефектов регулируют для улучшения сенсорных свойств и чувствительности. Толщину пленки (от нанометров) и ориентацию кристаллитов варьируют, чтобы минимизировать размерные эффекты и повысить эффективность. Возможности управления электрофизическими характеристиками пленок могут найти самые разнообразные применения. В частности, представляется перспективным использовать точную подгонку параметров четвертьволнового антиотражающего покрытия на оптических элементах оптических изоляторов Фарадея [1]. Это позволило бы улучшить его степень оптической изоляции.

Значительное внимание исследователей привлекают проблемы разработки низкочастотных технологий синтеза multifunctional материалов. В частности, оксид

цинка – это уникальный функциональный полупроводниковый материал с широкой запрещённой зоной (3.37 эВ), большой энергией связи экситона (60 мэВ), обладающий эффективной ультрафиолетовой люминесценцией [8,11,13].

В настоящее время интенсивно исследуются сенсорные свойства поликристаллических пленок на основе ZnO. В настоящей работе изучались пленочные образцы на основе ZnO с добавкой Al. В образцах диапазон изменения Al составлял 0-1,5 ат.%. Пленки были получены методом пиролиза. В связи с широкими возможностями практического использования оксидных полупроводников и композитных материалов на их основе разработка методов их получения и исследование свойств, полученных образцов, являются актуальными. Таким образом, от пленок ZnO с развитой поверхностью, состоящей из одномерных монокристаллов нанометровых размеров можно ожидать проявления необычных сенсорных, структурных и других электрофизических свойств. Проявление таких свойств должно быть связано, в том числе, с размерными эффектами, в результате которых возрастает вклад поверхностных процессов или поверхностных свойств по сравнению с объемными.

Методы и материалы исследования

Для проведения исследований в качестве исходного материала были использованы пленки цинка (Zn) толщиной 1 мкм. Целью проведенных исследований являлся синтез и исследование нанокompозитных пленок ZnO из пленок Zn.

Модификация пленки Zn, нанесенной на стекло, осуществлялась при постоянном электрическом напряжении $U=300$ В, времени выдержки $t = 10$ мин и температуре $T = 250$ °С. Исходный образец с цинковой пленкой фиксировался в прижимном устройстве, которое одновременно являлось и верхним электродом. Изучалось влияние на образец термообработки с одновременным действием электрического поля. Рядом с исследуемым образцом располагался контрольный образец, на который напряжение не подавалось. Существуют различные методы оценки адгезии [4-7]. В ряде работ было показано, что указанная подача напряжения приводит к значительному возрастанию адгезии проводящих и полупроводящих пленок к диэлектрической подложке [6-8,14,15]. Однако целью настоящей работы являлось не изучение адгезии, а выявление влияния рассматриваемой термообработки в электрическом поле на некоторые физические характеристики модифицируемых таким образом пленок.

Измерения величины электрического тока, проходящего через систему во время образования пленки ZnO, показывают значительное уменьшение первоначальной величины тока $I(t)$ с увеличением времени выдержки. Это уменьшение объясняется формированием высокоомного слоя в прианодной области диэлектрика вследствие его миграционной поляризации. При этом в самом начале процесса воздействия электрического поля, наблюдается пик зависимости $I(t)$, возможно, он соответствует некоторому увеличению площади фактического контакта пленки и стекла или связан с проявлением электрохимических реакций, происходящих на границе диэлектрик-электроды. Поверхности подложки и пленки обладают некоторым микрорельефом, поэтому при формировании образца ZnO возможно его изменение под действием электростатических сил, что также может приводить к появлению на зависимостях тока от времени максимума. Наконец при относительном большом токе в начале процесса модификации на границе пленка подложка происходит значительное выделение тепла, способствующее повышению проводимости диэлектрика и вызывающее соответствующий рост тока [8,11,13].

Полученные экспериментальные результаты показывают увеличение поверхностного сопротивления сформированной пленки ($R1 \approx 15$ Ом/кв) по сравнению с контрольным образцом ($R2 \approx 4$ Ом/кв). Скорее всего, это связано с окислением Zn ионами кислорода, поступающими под действием электрического поля из стекла к цинку. Данное предположение подтверждает тот факт, что после обработки пленки Zn становились полупрозрачными. Как известно, пленки ZnO являются полупрозрачными в видимом диапазоне света.

Методом сканирующей электронной микроскопии (измерения осуществлялись с помощью микроскопа Zeiss Merlin) [2,3,9,10,12]. была исследована морфология поверхности всех пленок, а микрорентгеноспектральным анализом был исследован их элементный состав.

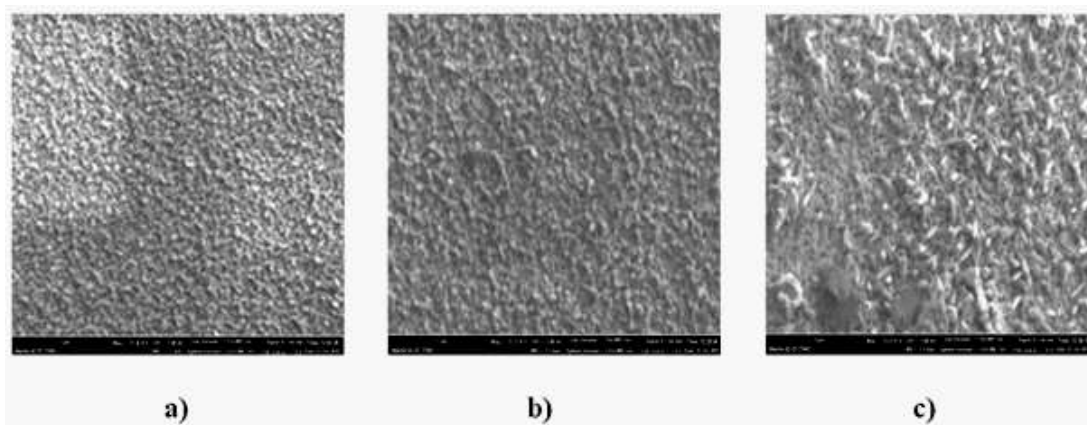


Рис.1. Изображение полученные методом сканирующей электронной микроскопии для пленок Zn и ZnO (после окисления) на стеклянной подложке:

а) – исходная пленка, б) – пленка, подвергнутая только действию температуры и окисления, в) пленка, подвергнутая действию температуры, окисления и поперечного электрического поля.

Время выдержки $t = 10$ мин., температура $T = 250$ °C

На рис. 1 представлены микрофотографии трех поверхностей пленок, полученных на разных стадиях обработки. На рис. 1а) изображен фрагмент поверхности исходной пленки цинка, на рис 1б) – поверхность пленки образца, находившегося в печи, но не подключенного к источнику электрического напряжения (время выдержки 10 мин. при температуре 250 °C), а на рис.1с) – фрагмент поверхности исходной пленки Zn после десятиминутной выдержки при температуре 250 °C и при дополнительном приложении к образцу поперечного электрического поля с потенциалом 300 В. При этом положительный потенциал был приложен к пленке, а отрицательный – к противоположной поверхности стекла.

Выводы

На рис. 1а) видно, что поверхность состоит из отдельных, близко расположенных трехмерных кристаллов, имеющих слабую кристаллическую огранку, средний размер которых находится в диапазоне ~50-200 нм. Из рис. 1б) видно, что температура не оказывает сильного влияния на структуру пленки, приводя лишь к ее подокислению. Фрагмент поверхности пленки Zn после десятиминутной обработки температурой и электрическим полем (рис.1с), характеризуется наличием большого количества слабо ориентированных к поверхности одномерных кристаллов. При поперечном размере этих кристаллов ~50-100 нм, их длина составляет ~500-1000 нм. Видно, что большинство нитевидных кристаллов ориентировано на поверхности пленки произвольным образом. Таким образом, приложе-

ние электрического поля существенно изменяет структуру поверхности пленки. Это позволяет сделать вывод о том, что локализованное вблизи поверхности пленки Zn неоднородное электрическое поле способствует получению пленок ZnO с развитой поверхностью, состоящей из одномерных монокристаллов нанометровых размеров. Варьируя технологические режимы термообработки под действием постоянного электрического смещения, есть возможность изменять концентрацию и линейные размеры одномерных кристаллов ZnO.

Список литературы

1. Козодаев Д.А., Погонишев А.О., Пщелко О.С., Пщелко Н.С. Изолятор Фарадея с кристаллическим магнитооптическим ротатором для лазеров // Патент на изобретение RU 2822210 C1, 03.07.2024. Заявка № 2024103829 от 15.02.2024.
2. Козодаев Д.А., Мошников В.А., Муратова Е.Н., Соломонов А.В., Трусов М.А. 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
3. Козодаев Д.А., Новиков И.А., Кимель А.В., Хусяинов 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.
4. 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.
5. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Алексеев П.А., Мошников В.А. Способ определения адгезионной прочности покрытий к подложке. Патент на изобретение RU 2635335 C1, 10.11.2017. Заявка № 2016122810 от 08.06.2016.
6. Пщелко Н.С., Козодаев Д.А. Электроадгезионные эффекты в диэлектриках. Нанотехнологии. Диагностика. Применение. В книге: От нанотехнологии к наноархитектонике Уфа, 2025. С. 13-107.
7. Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный университет. Санкт-Петербург, 2011
8. Пщелко Н.С., Водкайло Е.Г., Томаев В.В., Клименков Б.Д., Кошевой В.Л., Белорус А.О. Влияние электрического поля на адгезию и структуру проводящих пленок, нанесенных на диэлектрические подложки // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 8. С. 100-104.
9. Скорб Е.В., Козодаев Д.А., Новиков О.П., Корниенко П.И., Муравьев А.А., Муравьева Е.А., Ботнарь А.А., Пивень А.О., Старикова А.А. База данных изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ) самоорганизованных структур на основе каликсаренов и их мономерных аналогов на твердой подложке // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2025623701, 08.09.2025. Заявка № 2025623310 от 01.08.2025.
10. Толкач Н.М., Казанков А.И., Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А. Современное зондово-оптическое промышленное и научное оборудование для исследований аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов. // сборнике: Аморфные и микрокристаллические полупроводники. сборник трудов Международной конференции. Москва, 2025. С. 65-66.
11. Томаев В.В., Пщелко Н.С. Применение электроадгезионной технологии для модификации поверхности пленок оксида цинка. Научные механизмы решения проблем инновационного развития: сборник статей международной научно - практической конференции (28 ноября 2017 г, г. Уфа). В 3 ч. Ч.2 / - Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2017. – 214 с./- С. 87-89
12. Aglikov A.S., Zhukov M.V., Aliev T.A., Maslii V.I., Gelfenshtein P.V., Kozodaev D.A., Andreeva D.V., Nosonovsky M., Skorb E.V. Numerical and topological description of contact areas at different size scales for the contact of rough solid surfaces // Materials Horizons. 2025.
13. E.G. Vodkaylo, N.S. Pshchelko, V.V. Tomayev, V.A. Polishchuk, E.N. Borisov. Production and Research of Nanocrystalline ZnO films // Smart Nanocomposites. V. 6. № 2. 2015. P. 90.
14. Pshchelko N. S., Sevryugina M.P. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology // Advanced Materials Research, Vol. 1040, 2014, p 513-518
15. Pshchelko N.S., Tomaev V. V. Polarization of Surface Layers of Ionic Dielectrics at the Interface Between the Electroadhesive Contact and a Dielectric // Glass Physics and Chemistry. Vol. 42 No.1. 2016 . P.105 -109.

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОДЛОЖКАМ ЗА СЧЕТ СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ИВАНОВА С.А.¹, КОЗОДАЕВ Д.А.², ПЩЕЛКО Н.С.³,

^{1,3}*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

им. В.И. Ульянова (Ленина), ² ООО «Активная фотоника»

Аннотация. Показано, что появление больших тянущих полей в процессе получения электроадгезионного соединения электропроводящей пленки с диэлектриком становится возможным благодаря миграционной поляризации диэлектрика, развивающейся под действием приложенного к нему электрического напряжения. Это приводит к накоплению слоя отрицательного заряда малой толщины у анода. Поэтому приложенное напряжение фактически оказывается приложенным к тонкому слою объемного заряда у анода. Возникающие при этом сильные электрические поля приводят к скреплению контактирующих материалов. Использование данной технологии позволяет многократно увеличить адгезию проводящих пленок к диэлектрическим подложкам.

Ключевые слова: электрическое поле, электростатические силы, адгезия, проводящие пленки, структура.

Введение

Получение электропроводящих пленочных покрытий с высокой адгезией к диэлектрическим подложкам, на которые они нанесены – распространенная задача в различных технологических процессах [1-12]. В микро- и наноэлектронике получение высокой адгезии электропроводящих пленок на диэлектрических подложках (стекло, керамика, полимеры) сталкивается с рядом проблем:

- Низкая химическая совместимость: Диэлектрики не образуют прочных связей с металлами (Cu, Ag, Al), что приводит к отслоению при скоростях напыления $>1500 \text{ Å/s}$ или под влиянием циклических температур.
- Накопление заряда: при электронно-лучевом нанесении или литографии электроны отклоняются, искажая процесс; актуально для наноуровня (толщины 25–110 нм).
- Структурные дефекты: Неоднородная ориентация кристаллитов, окисление (например, Zn под действием кислорода из стекла) и высокая шероховатость полимерных подложек снижают адгезию.
- Межслойная адгезия: В многослойных структурах (хром-медь) напряжения между слоями вызывают деламинацию.

Основные методы решения:

- Адгезионные прослойки: напыление промежуточных слоев (Cr, Ti) в вакууме для механохимической активации поверхности.
- Поверхностная модификация: Плазменная обработка, ионизирующее излучение или срачивание пластин для снижения дефектов и повышения шероховатости.
- Проводящие покрытия: Нанесение полимерных или металлических слоев (центрифугирование/напыление) для рассеивания заряда в литографии.
- Электроадгезионные технологии: применение электрического поля и термической обработки во время или после нанесения — ускоряет рост пленки, улучшает адгезию, ориентацию кристаллитов и позволяет регулировать сопротивление наносимых покрытий.

Несмотря на принципиальную известность последнего из указанных методов, следует признать, что среди технологов по ряду причин он используется недостаточно широко.

Наш опыт сотрудничества с промышленными предприятиями показывает, что в значительной степени это связано с нежеланием модифицировать имеющиеся на предприятиях установки для нанесения покрытий. Для модификации требуется введение внутрь рабочего объема установок высоковольтных электродов, что, учитывая высокую стоимость установок, связано с определенными рисками. Кроме того, технологам не всегда понятны физические основы повышения адгезии по указанной технологии.

Поэтому целью настоящей работы является пояснение сути электроадгезионного способа повышения адгезии без использования излишнего для технологов математического аппарата и рассмотрение некоторых практических результатов.

Известные экспериментальные результаты по получению электроадгезионных «склеек» [7-12], или неуправляемых электроадгезионных контактов (НЭАК) давали основание считать, что термообработка пленок в сочетании с воздействием электрического поля позволит увеличить или, если необходимо, уменьшить прочность адгезионной связи пленки с диэлектрической подложкой. Как будет показано ниже, изменять адгезию пленок можно как после нанесения, так и в процессе конденсации пленки на подложку.

Физические основы электроадгезии

В настоящей работе представлен способ повышения адгезии электропроводящих слоев на диэлектрических подложках из ионных диэлектриков, основанный на использовании пондеромоторных сил электрического поля. Теоретическое обоснование способа и расчет возникающих электроадгезионных усилий приведено также в ряде наших работ [7-12], где показано, что возникающее давление может составлять единицы МПа, что при повышенной температуре значительно увеличивает адгезию нанесенных покрытий за счет диффузионных и электрохимических твердофазных процессов. Электроадгезия является результатом электростатического (пондеромоторного) притяжения электризованных тел, при котором заряды разных знаков оказываются разделены зазором между контактирующими поверхностями или тонким слоем одного из скрепляемых объектов, обедненном носителями заряда, и имеющим поэтому повышенное сопротивление, примыкающее к поверхности раздела контакта. Большая часть приложенного напряжения поэтому падает на этот узкий слой, что и является причиной появления больших электростатических полей и сил.

Для получения больших усилий притяжения в точках фактического контакта используется миграционная поляризация, наблюдаемая в ионных диэлектриках. Миграционная поляризация заключается в том, что под действием сил электростатического поля слабо закрепленные ионы в диэлектрике дрейфуют к соответствующему электроду. В случае ионного диэлектрика носителями заряда являются обычно положительные ионы, поэтому при включении напряжения они начнут перемещаться (мигрировать) к катоду. При этом в месте, занимавшемся положительным ионом до подачи напряжения, у анода останется нескомпенсированный заряд вакансии. Именно этот отрицательный заряд и является причиной появления больших электроадгезионных усилий, т.к. он расположен непосредственно у анода. Если в качестве анода используется электропроводящая пленка, она в силу указанных причин будет повышать свою адгезию к диэлектрической подложке.

Используемые материалы и результаты исследования

Исследования проводились на ряде пар материалов, основными из которых являлись пленки алюминия и меди на стекле С47-1. Кроме того, для отдельных экспериментов с целью проверки универсальности метода были использованы подложки из других широко применяемых стекол К8, С52-1, оконного стекла и ситалла СТ50-1. В качестве материалов

для покрытий исследовались также молибден, хром, тантал и золото. Все эти материалы широко используются при нанесении на подложки и, кроме того, они обладают различной адгезионной способностью, что было важно для более полного изучения возможностей исследуемого метода увеличения адгезии. Пленки меди, алюминия, золота и хрома наносились методом термического испарения в вакууме. Пленки молибдена и тантала получались распылением ионной бомбардировкой. Давление аргона в момент нанесения было порядка $4 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Толщины пленок составляли $1,5 \div 2$ мкм.

Эксперименты, связанные с изучением влияния электрического поля на адгезию тонких металлических пленок, проводилась с использованием муфельной печи, в которую помещалась диэлектрическая подложка с нанесенным на нее электропроводящим покрытием. Электрическое поле создавалось путем приложения электрического напряжения между электропроводящим покрытием (как правило, оно находилось сверху) и противоположной стороной подложки (снизу).

В качестве примера на рис.1 приведены некоторые зависимости, демонстрирующие возможность повышения адгезии предлагаемым способом. Для количественной оценки адгезии использовался адгезиометр Кротовой и Дерягина, приспособленный нами для измерения адгезии пленок: на нанесенное пленочное покрытие наклеивалась тонкая липкая лента (скотч) [10].

С повышением температуры, при которой получалось соединение, удалось увеличить адгезию пленок меди в четыре раза, алюминия - в шесть раз по сравнению с исходной. Адгезия пленок на контрольных образцах (к которым напряжение приложено не было) практически не изменялась.

Приложение к пленке отрицательного потенциала обычно приводило к уменьшению адгезии. По-видимому, причина уменьшения адгезии заключается в обогащении зоны контакта стекло - пленка ионами щелочных металлов, которые разрыхляют стекло и уменьшают его механическую прочность.

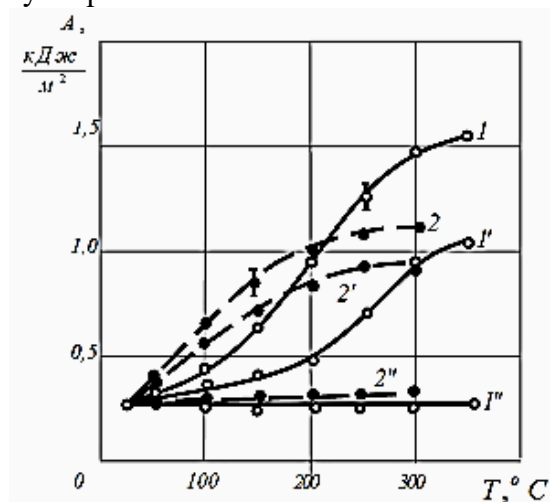


Рис.1. Зависимости работы отрыва медной (пунктир) и алюминиевой (сплошные линии) пленок к подложкам из оконного стекла от температуры электроадгезионной обработки. Время выдержки $t = 10$ мин для кривых 1, 2 ($U = 300$ В) и $t = 5$ мин – для кривых 1'', 2'' ($U_0 = 0$) и 1', 2' ($U_0 = 300$ В). Адгезия пленок измерялась при комнатной температуре.

Заключение

Проведенные эксперименты позволяют заключить, что рассмотренная технология имеет следующие преимущества:

1. Значительное повышение адгезии электропроводящих пленок к диэлектрическим подложкам без каких-либо промежуточных слоев, что критично для микро- и наноэлектроники.

2. Многократное увеличение адгезии без дополнительных химических или механических обработок.

3. Одновременная возможность модификации структуры пленок (например, более однородная мелкозернистая морфология), повышение скорости роста и возможность управления электрофизическими свойствами пленки, такими, например, как поверхностное сопротивление.

4. Универсальность: применимо к любому методу нанесения (термическое испарение, ионно-плазменное распыление и др.), простота реализации без сложного оборудования.

Список литературы

1. Афанасьев В.П., Чигирев Д.А., Пщелко Н.С., Сидорова Н.П. Влияние постоянного электрического поля на процессы осаждения тонких металлических пленок платины методом ионно-плазменного распыления // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып.6. С.59-65.
2. Козодаев Д.А., Мошников В.А., Муратова Е.Н., Соломонов А.В., Трусков М.А. 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
3. Козодаев Д.А., Яковлева А.А., Бобков А.А., Рябко А.А., Мошников В.А., Корепанов О.А. 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
4. Козодаев Д.А. Электретный эффект в структурах $Si-SiO_2$ и $Si-SiO_2-Si_3N_4$. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Санкт-Петербург, 2002
5. 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.
6. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Алексеев П.А., Мошников В.А. Способ определения адгезионной прочности покрытий к подложке. Патент на изобретение RU 2635335 C1, 10.11.2017. Заявка № 2016122810 от 08.06.2016.
7. Нагорный В.С., Пщелко Н.С., Сидорова Н.П. Анализ динамики процесса формирования электроадгезионного контакта. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 6 (91). С. 166-170.
8. Пщелко Н.С. Использование электрического поля для повышения адгезии электропроводящих пленок к диэлектрическим подложкам при вакуумном нанесении // Вакуумная техника и технология. 2010 г. №1. С. 31-36.
9. Пщелко Н.С., Козодаев Д.А. Электроадгезионные эффекты в диэлектриках. Нанотехнологии. Диагностика. Применение. В книге: От нанотехнологии к наноархитектонике Уфа, 2025. С. 13-107.
10. Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлodieлектрических структур. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный университет. Санкт-Петербург, 2011
11. Pshchelko N. S., Sevryugina M.P. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology // Advanced Materials Research, Vol. 1040, 2014, p 513-518
12. Pshchelko N.S., Tomaev V. V. Polarization of Surface Layers of Ionic Dielectrics at the Interface Between the Electroadhesive Contact and a Dielectric // Glass Physics and Chemistry. Vol. 42 No.1. 2016 . P.105 -109.

ДАТЧИК ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ОБЪЁМОВ ВЕЩЕСТВА

Е.В. ИЛЬИН, К.Г. ЕЛАНСКАЯ, Д.С. АГАФОНОВА

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

Аннотация. Предложена структура датчика показателя преломления на основе двумерного фотонного кристалла с дефектами для исследования малых объемов вещества, приведены результаты расчёта структуры – спектры пропускания для трех анализируемых веществ с показателями преломления 1,33, 1.35, 1.37 отн. ед. Определены чувствительность структуры к изменению показателя преломления в заданной части устройства, а также рассчитана добротность резонансных пиков пропускания, использующихся для оценки показателя преломления.

Ключевые слова: двумерный фотонный кристалл, датчик показателя преломления

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) являются периодическим оптическим материалом, структура которого имеет пространственную модуляцию показателя преломления. Одним из главных свойств ФК является наличие фотонной запрещённой зоны (ФЗЗ), то есть диапазона длин волн, при соответствии которому электромагнитная волна не может распространяться внутри ФК. Характерный период решётки сопоставим с длиной волны в рабочем диапазоне устройства. Благодаря наличию ФЗЗ и размерам конечных структур на основе ФК с дефектами возможно создавать компактные волноводы сложной формы с малыми потерями, оптические переключатели, оптические логические элементы, датчики показателя преломления и температуры и другие устройства [1].

Наиболее перспективными для сенсорных применений являются щелевые, резонаторные и топологические ФК структуры, а также структуры, в которых повышение чувствительности достигается за счет снижения групповой скорости, поскольку они обеспечивают рост чувствительности, увеличение добротности и возможность встраивания в компактные интегральные и микрофлюидные системы [2–6].

Структура датчика показателя преломления и оптимизация чувствительности

В работе представлено моделирование датчика показателя преломления на основе двумерного фотонного кристалла с дефектами с высокой чувствительностью для детектирования показателя преломления малых объемов анализируемого вещества.

Исследованная структура показана на рисунке 1. Массив ФК, составляющий основу устройства датчика, представляет из себя набор кремниевых столбиков, окружённых диоксидом кремния, период решётки ФК 500 нм, радиус столбиков 100 нм. Структура датчика состоит из двух волноводов в виде протяжённых дефектов в массиве ФК (отсутствие ряда кремниевых столбиков) и расположенного между ними резонатора – полый область овальной формы, обладающей чувствительностью к изменению показателя преломления. При изменении показателя преломления анализируемого вещества происходит изменение резонансной частоты, т.е. наблюдается сдвиг пика пропускания для данной структуры. Из-за того, что на положение пика пропускания влияют только параметры вещества непосредственно в области резонатора, для работы предложенного датчика не требуется большой объём анализируемого вещества.

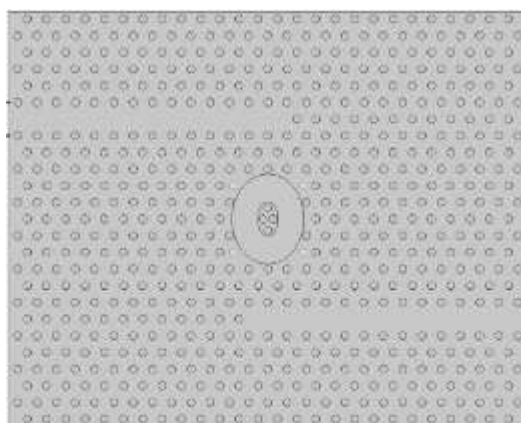


Рис. 1. Геометрия исследованной структуры

Также в ходе работы была проведена оптимизация прилегающего к резонаторной области края ФК массива и выявлено влияние расположения группы окружающих резонатор столбиков на чувствительность структуры. В частности, исследовалась зависимость чувствительности датчика от сдвига столбиков, выделенных светло-серым цветом на рисунке 1. Результат представлен на рисунке 2, оптимальным является смещение порядка 160 нм. Полученные при моделировании пики пропускания при различных показателях преломления представлены на рисунке 3.

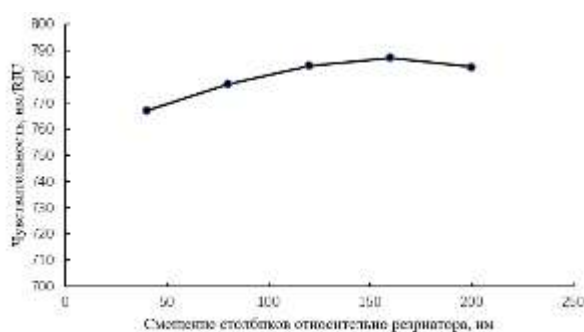


Рис. 2. Зависимость чувствительности структуры от смещения

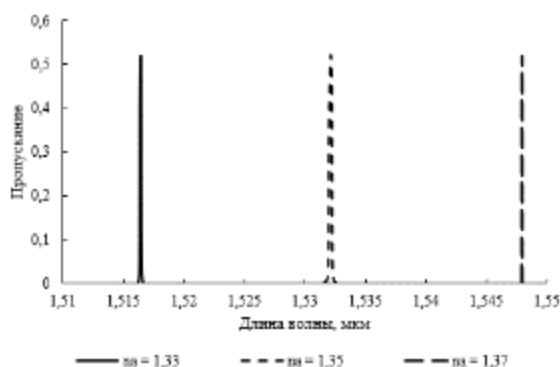


Рис. 3. Пропускание исследованной структуры при различных значениях показателя преломления аналита

Чувствительность исследованной структуры составила 780 нм/РИУ. Резонансные пики структуры обладают добротностью в диапазоне от 4000 до 20000.

Заключение

Чувствительность предлагаемой структуры находится на одном уровне с другими датчиками показателя преломления на основе фотонных кристаллов, например описанными в [3,4,7]. Для работы предложенного сенсора требуется меньший объем анализируемого

вещества за счет ограничения области введения аналита резонаторной областью структуры. Оптимизацией границы дефекта и массива ФК достигнуто повышение чувствительности структуры до 780 нм/RIU.

Список литературы

1. Butt M. A., Khonina S. N., Kazanskiy N. L. // Optics & laser technology. 2021. Т. 142. С. 107265.
2. Gao Y., Ddong P., Shi Y. // Optics Express. 2020, № 28. С. 272–278.
3. Liu Y., Saleh M. H.-W.-M. // Europhysics Letters. 2014, № 107. С. 8.
4. Nohoji A.-H.-A., Danaie M. // Optical and Quantum Electronics. 2022, № 54. С. 6.
5. Sidorov A. I., Ignatieva L. A. // Optik. 2021, № 245. С. 7685.
6. Barvestani J. // Scientific Reports. 2025, № 1. С. 43675.
7. Wang B., Dundar M.-A., Notzel R. et al. // Applied Physics Letters. 2010, № 97. С. 151105.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОЛИНЗ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ ОПЛАВЛЕНИИ ТОРЦОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

КАЛИНИН В.И., АГАФОНОВА Д.С.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному исследованию процесса формирования микрооптических элементов на торцах кварцевых волокон типа Corning J-VH. Рассматривается метод бесконтактного оплавления с использованием CO₂-лазера. В ходе работы установлены зависимости параметров циркулярности и аспектного отношения линз от мощности лазерного излучения и скорости сканирования. Определены оптимальные режимы, обеспечивающие формирование сферических поверхностей. Для количественного анализа геометрии применена методика цифровой обработки изображений в среде ImageJ.

Ключевые слова: микрооптические элементы на торцах кварцевых волокон, метод бесконтактного оплавления, методика цифровой обработки изображений.

Введение

Развитие современной волоконной оптики и фотоники требует создания высокоэффективных узлов связи между активными компонентами (лазерными диодами) или фотонными интегральными схемами и транспортными волокнами. Основной проблемой является рассогласование диаметров модовых полей, что приводит к значительным потерям мощности (до 50-70% без использования согласующих элементов).

Одним из наиболее перспективных решений является формирование микролинзы непосредственно на торце волокна. Это позволяет трансформировать волновой фронт и увеличить числовую апертуру волокна. Метод лазерного оплавления CO₂-лазером (длина волны 10,6 мкм) обладает рядом преимуществ перед химическим травлением и фотополимеризацией: высокой скоростью обработки, чистотой поверхности за счет отсутствия химикатов и возможностью прецизионного управления радиусом кривизны.

Постановка задачи

Основной задачей данного исследования является поиск стабильного «технологического окна» — сочетания параметров мощности лазера и скорости обработки, при которых силы поверхностного натяжения расплавленного кварца формируют максимально симметричную сферу.

Для достижения цели необходимо:

1. Провести серию термических оплавлений торцов волокон в различных режимах.
2. Оценить влияние избыточной мощности на деформацию линзы (переход в каплевидную форму).
3. Исследовать причины возникновения асимметрии при высоких скоростях сканирования.
4. Провести статистическую оценку воспроизводимости разработанного техпроцесса.

Методика эксперимента

Экспериментальная часть выполнялась на установке RF Yongli на базе CO₂-лазера с максимальной мощностью 30 Вт, максимальной скоростью сканирования 7000 мм/с. Предварительно подготовленное оптическое волокно Corning MMF 62.5/125 (в области торца без полимерных покрытий, скол под 90°) закреплялось в патроне с возможностью вращения. Контроль геометрии осуществлялся с помощью оптического промышленного микроскопа (увеличение 500х) с последующей обработкой снимков в программе ImageJ. Для количественной оценки геометрии сформированной микролинзы использовались два параметра: *циркулярность* (*Circularity*, *C*), определяющая степень близости сечения микролинзы к идеальному кругу с учетом гладкости границ, и *аспектное отношение* (*Aspect Ratio*, *AR*), характеризующее степень вытянутости (эллиптичности) сформированного торца.

Результаты и обсуждение

Влияние мощности: На рисунках 1 и 2 представлены зависимости параметров *Circularity* и *Aspect Ratio* от относительной мощности лазерного излучения. Из рисунков видно, что до уровней мощности 92%, наблюдается больший разброс параметров *C* и *AR* ($0,940 < C < 0,989$; $1,04 < AR < 1,58$). В диапазоне мощности 92%-96% от максимальной формируется наиболее стабильная сфера ($C \approx 0.98$).

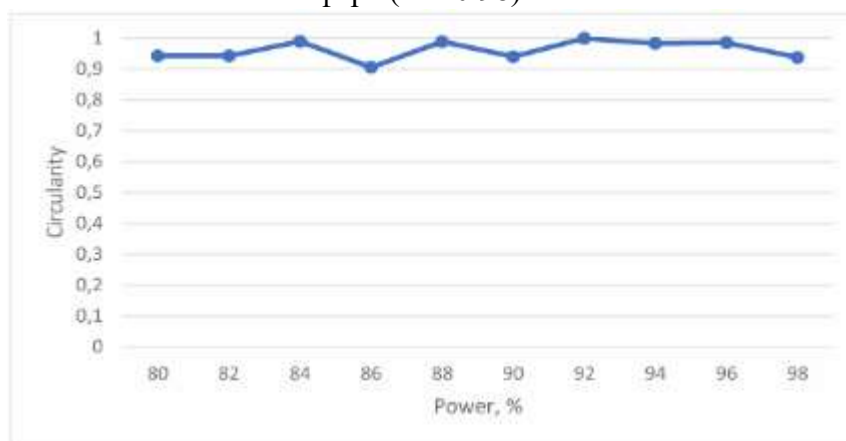


Рис. 1 Зависимость параметра *Circularity* (*C*) от мощности лазерного излучения

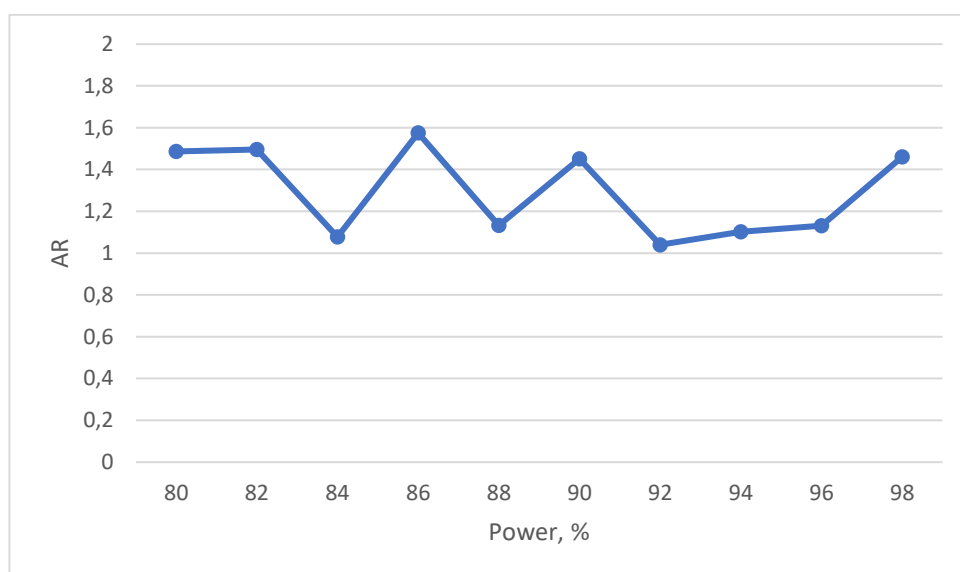


Рис. 2 Зависимость параметра Aspect Ratio (AR) от мощности лазерного излучения



Рис. 3 Микрофотография торца волокна с дефектом формы при избыточной скорости сканирования (95%)



Рис. 4 Микрофотография торца волокна при скорости сканирования 65%

При повышении мощности до 96%–100% вязкость кварца падает, и под воздействием динамических сил капля вытягивается, что увеличивает аспектное отношение (AR) и приводит к астигматизму (рис. 2).

Влияние скорости: В ходе экспериментов выявлено, что при скорости сканирования выше 90% от максимальной наблюдается эффект «недогрева» одной из сторон волокна

из-за инерционности механической системы вращения волокна, что выражается в росте AR до 2.38. При этом формируется дефектная микролинза (рис. 3). Оптимальный режим для скорости сканирования 65% (рис. 4).

Воспроизводимость: Серии из 10 опытов при фиксированных параметрах показали, что максимальный коэффициент вариации по параметру циркулярности составляет 7.82%, что подтверждает надежность метода при условии точного соблюдения режимов.

Заключение

В работе определен оптимальный режим лазерного формирования микролинз: мощность 88% от максимальной (26,4 Вт) при скоростях сканирования около 65% (4550 мм/с). Полученные данные позволяют автоматизировать процесс изготовления волоконно-оптических зондов и согласующих элементов с заданными характеристиками.

Список литературы

1. Листвин А. В., Листвин В. Н. Дефекты оптического волокна. Солон-Пресс, 2018. (дата обращения: 19.04.2025).
2. Вейко, В. П. Лазерные технологии в микрооптике / В. П. Вейко. — СПб: ИТМО, 2011. — 104 с. (дата обращения: 23.04.2025).
3. Шандаров В. М. Основы физической и квантовой оптики. — Томск: ТУСУР, 2012. — 197 с. (дата обращения: 29.04.2025).

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛАНДАУ–ГИНЗБУРГА–ДЕВОНШИРА ИЗ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

КАРЫМСАКОВ К. Е., ЗУБКО С. П., ДМИТРИЕВ К. А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ульянова
(Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В работе предложена методика количественной оценки нелинейности диэлектрического отклика сегнетоэлектрических плёнок на основе извлечения коэффициентов Ландау–Гинзбурга–Девоншира непосредственно из вольт-фарадных характеристик. Путём численного интегрирования получена зависимость поляризации от электрического поля. Положительный знак первого коэффициента Ландау указывает на параэлектрический характер отклика в исследованном диапазоне полей. Показано, что первый коэффициент Ландау, линейно зависящий от температуры, может служить количественной мерой термостабильности материала, а предложенный метод – инструментом для сравнительного анализа температурной стабильности однослойных и многослойных сегнетоэлектрических структур.

Ключевые слова: термостабильность, сегнетоэлектрик, конденсатор

Тонкие плёнки BaSrTiO_3 (BSTO) активно исследуются для энергонезависимой памяти, перестраиваемых СВЧ-устройств и нейроморфных систем благодаря стабильной сегнетоэлектрической фазе и совместимости с КМОП-технологией. Практическое применение требует обеспечения температурной стабильности диэлектрического отклика в широком интервале рабочих температур. Один из способов улучшения термостабильности – создание многослойных структур с градиентом состава, в которых фазовый переход размывается, а пик диэлектрической проницаемости становится более плоским.

Для количественного описания нелинейности и температурной эволюции диэлектрического отклика используется феноменологическая теория Ландау–Гинзбурга–Девоншира (ЛГД) [1]. В рамках этой теории ключевым параметром является коэффициент α и β в разложении свободной энергии. Согласно [1], в параэлектрической фазе и в области сильных полей уравнение состояния имеет вид:

$$E = \alpha P + \beta P^3.$$

А дифференциальная диэлектрическая проницаемость определяется как:

$$\varepsilon = \varepsilon(0) \frac{1}{1 + 3\beta\varepsilon(0)\varepsilon_0 P^2}.$$

Причём в парафазе $\alpha > 0$ и линейно зависит от температуры:

$$\alpha \propto T - T_0,$$

где T_0 – температура Кюри–Вейсса. Таким образом, производная $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ служит непосредственной количественной мерой термочувствительности материала. Чем она меньше, тем стабильнее ёмкость при изменении температуры.

В многослойных плёнках, распределение температуры Кюри по толщине приводит к диффузному фазовому переходу и эффективному уменьшению $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$. Следовательно, извлекая коэффициент α из ВФХ, измеренных при разных температурах, можно напрямую сравнивать термостабильность одно- и многослойных структур.

В данной работе предложена простая и физически обоснованная методика извлечения α и β непосредственно из стандартных ВФХ сэндвич-конденсатора. Сэндвич-структура обеспечивает однородное распределение электрического поля, что позволяет корректно применять модель Ландау и минимизировать влияние геометрических факторов. На рис. 1 представлена ВФХ сэндвич-конденсатора.

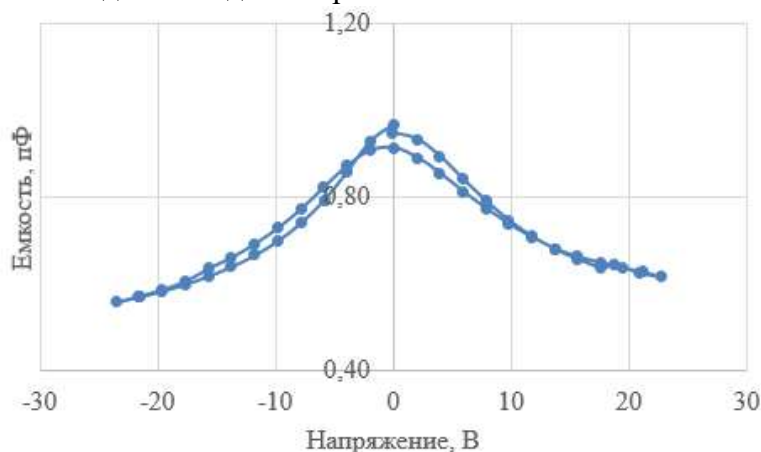


Рис. 1. ВФХ конденсатора

Для перехода от измеренной ёмкости $C(U)$ к зависимости поляризации от поля $P(E)$ используется соотношение, вытекающее из определения дифференциальной ёмкости плоского конденсатора с однородным полем и отсутствии утечек:

$$\frac{\partial P}{\partial E} = \frac{Cd}{S}.$$

Численное интегрирование данного выражения дает $P(E)$. Затем область сильных полей, где влияние доменных стенок и гистерезиса минимально, аппроксимируется полиномом Ландау $E = \alpha P + \beta P^3$ методом наименьших квадратов. На рис. 2 представлены графики зависимости напряженности электрического поля от поляризации для теоретической модели Ландау и экспериментальных данных. Аппроксимация даёт следующие значения коэффициентов Ландау: $\alpha = 1.417 \cdot 10^8$ Вм/Кл и $\beta = 2.811 \cdot 10^8$ Вм⁵/Кл³ коэффициенте корреляции $R^2 = 0.997$. Положительный знак α подтверждает, что в исследованном диапазоне полей материал находится в параэлектрической фазе в данном диапазоне полей, что согласуется с подавлением спонтанной поляризации сильным внешним полем. Физически коэффициент α определяет крутизну зависимости поляризации от электрического поля и связан с обратной диэлектрической проницаемостью. Коэффициент β характеризует степень нелинейности диэлектрического отклика.

Полученные значения коэффициентов Ландау $\alpha = 1.417 \cdot 10^8$ Вм/Кл и $\beta = 2.811 \cdot 10^8$ Вм⁵/Кл³ соответствуют типичным значениям для сегнетоэлектрических материалов на основе BST, приведённым в литературе. Отношение $\frac{\beta}{\alpha^3} \approx 10^{-17}$ характеризует умеренную нелинейность диэлектрического отклика и также находится в диапазоне, наблюдаемом для тонкоплёночных структур. В рамках феноменологической теории Ландау–Девоншира коэффициенты разложения свободной энергии не являются универсальными константами и зависят от температуры, фазового состояния и внешних условий [2]. В работах, посвящённых BaTiO₃ и родственными материалам, показано, что коэффициенты Ландау подбираются для описания экспериментальных зависимостей диэлектрической проницаемости и поляризации, и могут существенно изменяться при варьировании температуры и структуры материала [3,4]. Стоит также добавить, что вклад высших членов мал в области таких полей.

Дополнительно следует учитывать, что в тонкоплёночных сегнетоэлектриках значения коэффициентов Ландау отличаются от объёмных вследствие влияния механических напряжений, размерных эффектов и граничных условий [5]. Таким образом, полученные в работе значения α и β следует рассматривать как эффективные параметры, соответствующие исследуемой структуре, и они находятся в согласии с литературными данными.

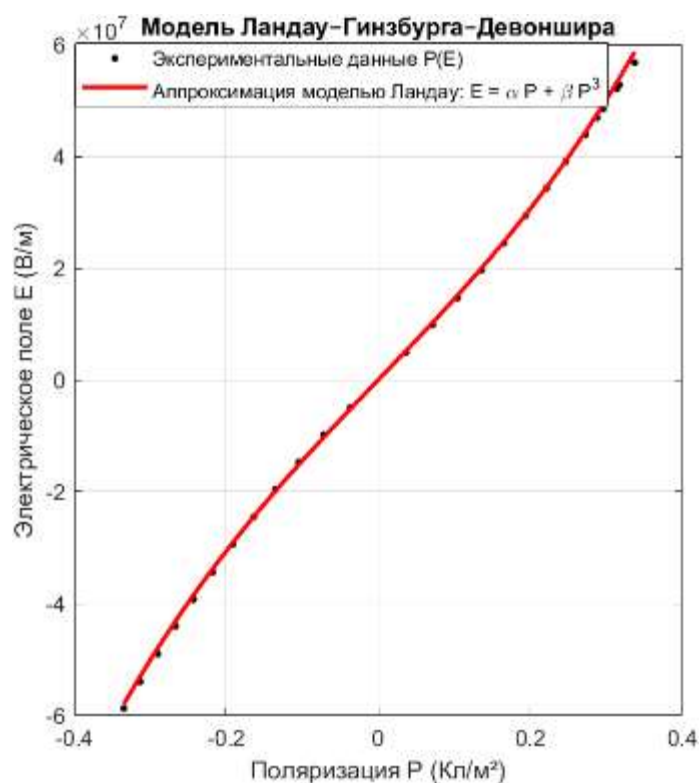


Рис. 2. Графики зависимости напряженности электрического поля от поляризации для теоретической модели Ландау и экспериментальных данных

Ключевое преимущество предложенного метода состоит в том, что он позволяет извлекать коэффициент α непосредственно из ВФХ. Поскольку в теории ЛГД $\alpha(T)$ линейно зависит от температуры, измерение ВФХ при нескольких температурах и последующее извлечение $\alpha(T)$ даёт прямую количественную оценку термочувствительности материала. Следует отметить, что корректность метода определяется предположением об однородности электрического поля и применимостью параэлектрического приближения. Предложенный подход может быть использован для быстрой оценки пригодности сегнетоэлектрических материалов для температурно-стабильных СВЧ-устройств.

Естественным развитием методики является её применение к многослойным сегнетоэлектрическим структурам. В многослойных плёнках BSTO с градиентом концентрации каждый слой характеризуется своей локальной температурой Кюри-Вейсса T_0^i . Эффективная диэлектрическая проницаемость многослойной структуры определяется распределением электрического поля по слоям и в общем случае не сводится к простой сумме. Однако в первом приближении она может быть представлена как взвешенная суперпозиция вкладов отдельных слоёв. Суммарный диэлектрический отклик представляет собой суперпозицию вкладов отдельных слоёв:

$$\varepsilon_{eff}(T) = \sum_i L_i \varepsilon_i(T),$$

где L_i - весовые коэффициенты, определяемые толщинами слоёв. Это должно приводить к размытию фазового перехода и, как следствие, к уменьшению эффективного $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ по

сравнению с однослойной плёнкой. Таким образом, предложенный подход позволяет перейти от качественного анализа ВФХ к количественной оценке температурной стабильности. Это позволяет использовать предложенную методику не только для анализа экспериментальных данных, но и для целенаправленного проектирования сегнетоэлектрических структур с заданной температурной стабильностью.

Список литературы

1. Tagantsev A. K. et al. Ferroelectric materials for microwave tunable applications //Journal of electroceramics. 2003. Т. 11. №. 1. С. 5-66.
2. Lines M. E., Glass A. M. Principles and applications of ferroelectrics and related materials. Oxford university press, 2001.
3. Íñiguez J. et al. Devonshire-Landau free energy of BaTiO₃ from first principles //Physical Review B. 2001. Т. 63. №. 14. С. 144103.
4. Morozovska A. N. et al. Landau-Ginzburg-Devonshire theory for electromechanical hysteresis loop formation in piezoresponse force microscopy of thin films //Journal of Applied Physics. 2011. Т. 110. №. 5.
5. Schlom D. G. et al. Strain tuning of ferroelectric thin films //Annu. Rev. Mater. Res. 2007. Т. 37. №. 1. С. 589-626.

АВТОНОМНАЯ МЕТЕОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA328 С БЕСПРОВОДНЫМ ДАТЧИКОМ

КОВАЛЕВ А. С.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация. Представлена разработка автономной метеостанции, состоящей из базового модуля на микроконтроллере Atmega328 и выносного беспроводного датчика. Базовый модуль отображает значения температуры, влажности и атмосферного давления, реализует алгоритм краткосрочного прогноза осадков и оснащён адаптивной RGB-подсветкой, цвет которой изменяется в зависимости от времени суток. Выносной датчик за счёт применения алгоритмов глубокого энергосбережения способен работать без замены элемента питания до пяти лет.

Ключевые слова: метеостанция, Atmega328, беспроводной датчик, энергосбережение, BME280, NRF24L01, прогноз осадков, RGB-подсветка.

Введение

Контроль параметров микроклимата и получение достоверной информации о погодных условиях относятся к числу востребованных задач. Серийные метеостанции, как правило, либо обладают ограниченным набором функций, либо требуют частой замены элементов питания в выносных модулях. Целью настоящей работы являлась разработка полностью автономной метеостанции с расширенными возможностями: прогнозом осадков по динамике атмосферного давления, адаптивной RGB-подсветкой, имитирующей естественные природные явления, и беспроводным датчиком, способным функционировать пять лет от одного литиевого элемента. Конструктивно устройство выполнено на печатных платах собственного изготовления, корпусные детали реализованы методом 3D-печати.

Базовая станция

Аппаратная платформа базовой станции построена на микроконтроллере Atmega328, тактируемом от внешнего керамического резонатора с частотой 16 МГц. Питание схемы осуществляется от источника постоянного тока напряжением 5 В. Для обеспечения питания радиомодуля NRF24L01 применён отдельный линейный стабилизатор AMS1117 с выходным напряжением 3,3 В. Хронометрические функции реализованы на модуле часов

реального времени DS3231SN, сохраняющем актуальные значения времени при пропадании основного питания. Измерение атмосферного давления и температуры выполняется цифровым датчиком BMP280, относительная влажность регистрируется датчиком АНТ20. Для автоматической адаптации яркости нижней подсветки и подсветки дисплея к внешним условиям освещённости используется фоторезистор, подключённый к аналоговому входу микроконтроллера. Управление режимами отображения информации осуществляется с помощью сенсорной кнопки на модуле ТТР223.

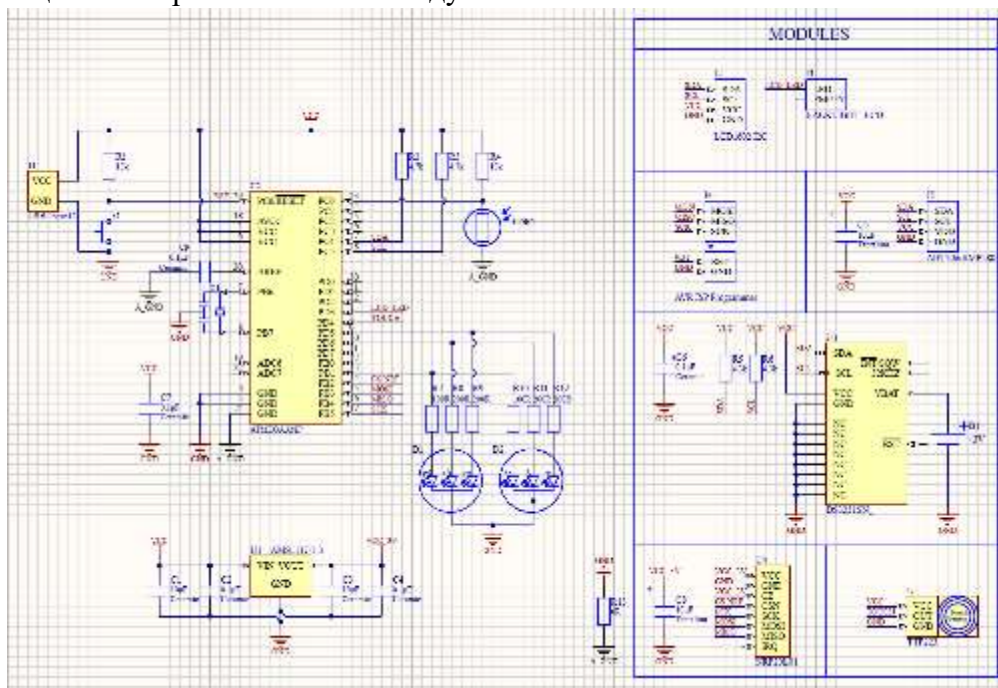


Рис. 1. Принципиальная схема базовой станции

Печатная плата базовой станции изготовлена фоторезистивным методом, токоведущие дорожки защищены паяльной маской. Разводка спроектирована с учётом ручного монтажа переходных отверстий. Нижний слой платы отведён под сплошной полигон земли. Проведённый анализ показал, что разделение цифровой и аналоговой земли для цепи фоторезистора избыточно – достаточным оказалось размещение керамического конденсатора ёмкостью 0,1 мкФ непосредственно на входе АЦП. Из-за пониженной чувствительности глаза к красной области спектра и меньшей светоотдачи красного кристалла для визуального выравнивания яркости ток красного светодиода задан резистором 100 Ом, а зелёного и синего — резисторами 200 Ом.

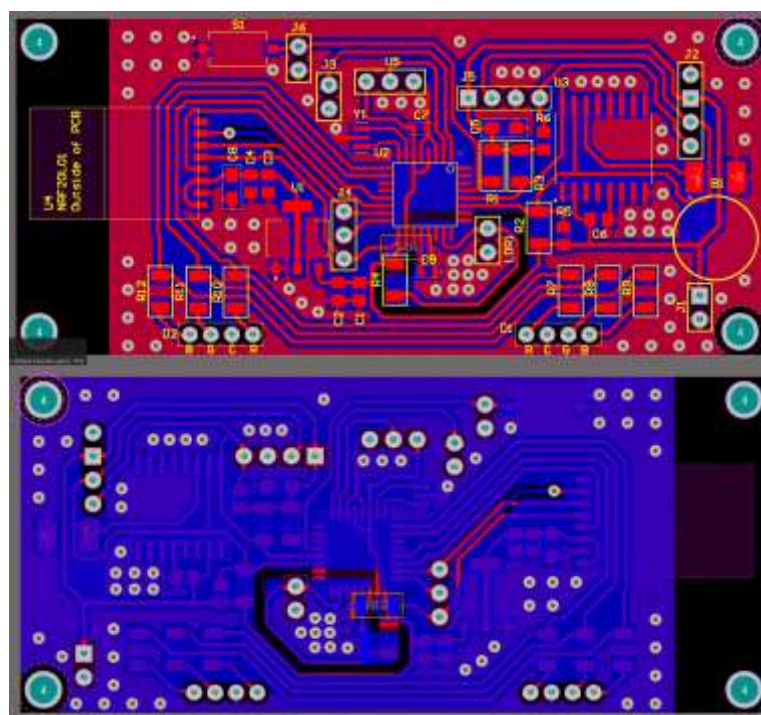


Рис. 2. Топология печатной платы базовой станции

Программное обеспечение

Фильтрация сигнала фоторезистора. Для подавления шумов аналого-цифрового преобразователя, вызывающих мерцание подсветки, реализована каскадная фильтрация: медианный фильтр третьего порядка с последующим экспоненциальным сглаживанием. Такой подход полностью исключил случайные всплески и обеспечил стабильность яркости.



Рис. 3. Корпус и печатная плата базовой станции

Прогноз осадков. Прогнозирование основано на анализе скорости изменения атмосферного давления. Датчик BMP280 производит измерения каждые 10 минут. По шести

последовательным значениям методом наименьших квадратов строится линейная аппроксимация, коэффициент наклона которой характеризует изменение давления за час и используется для расчёта вероятности осадков.

Контроль связи. При отсутствии данных от выносного датчика в течение 60 минут показания на дисплее заменяются прочерками, что исключает отображение устаревшей информации.

Атмосферная подсветка. Цвет нижней подсветки плавно меняется в зависимости от времени суток, имитируя природные явления: золотисто-жёлтый рассвет (8:00–11:00), голубое небо (11:00–17:00), розовый закат (17:00–20:00), алый вечер (20:00–22:00), фиолетовое северное сияние (23:00–8:00). Плавность переходов обеспечивается линейной интерполяцией значений каждого из трёх цветовых каналов RGB.

Выносной датчик

Схемотехника. Для обеспечения круглогодичной эксплуатации в уличных условиях использована компактная литиевая батарея CR123A ёмкостью 1300 мА·ч, стабильно работающая в диапазоне от –40 до +60 °С и превосходящая по морозостойкости щелочные элементы. Выносной датчик построен на микроконтроллере Atmega328, включает датчик BME280 и радиомодуль NRF24L01. Все компоненты рассчитаны на питание от 3 В, что позволило отказаться от повышающих преобразователей. Импульсное потребление при выходе из спящего режима сглаживается накопительным конденсатором ёмкостью 10 мкФ, установленным на входе питания.

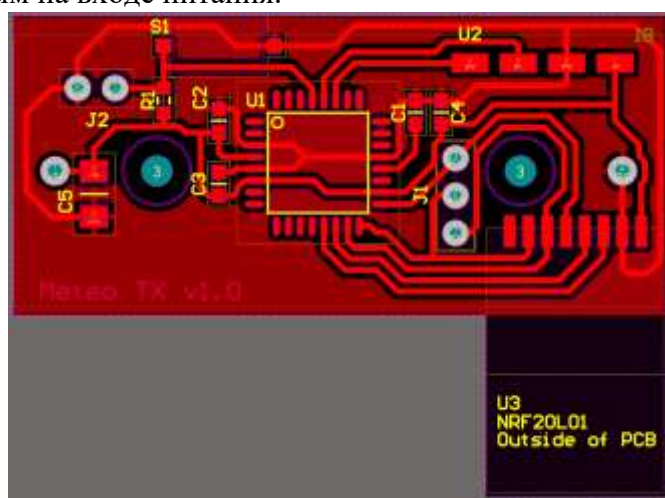


Рис. 4. Топология печатной платы выносного датчика

Энергосбережение. Микроконтроллер переводится в режим Power-Down с отключением ядра, ОЗУ, АЦП и цифровых интерфейсов; активными остаются только сторожевой таймер и схема пробуждения. Порог детектора понижения напряжения (BOD) установлен на 1,8 В. Датчик BME280 работает в принудительном режиме (forced mode), выполняя однократное измерение с последующим переходом в спящее состояние. Для дополнительной экономии заряда тактовая частота снижена с 16 до 1 МГц.

Измеренное среднее потребление составило 23 мкА в спящем режиме и 748 мкА в активном. Устройство активируется на 2 с каждые полчаса, находясь в состоянии сна 99,89 % времени. При ёмкости батареи CR123A 1300 мА·ч расчётная продолжительность автономной работы превышает 6 лет; с учётом внешних факторов составляет около 5 лет.

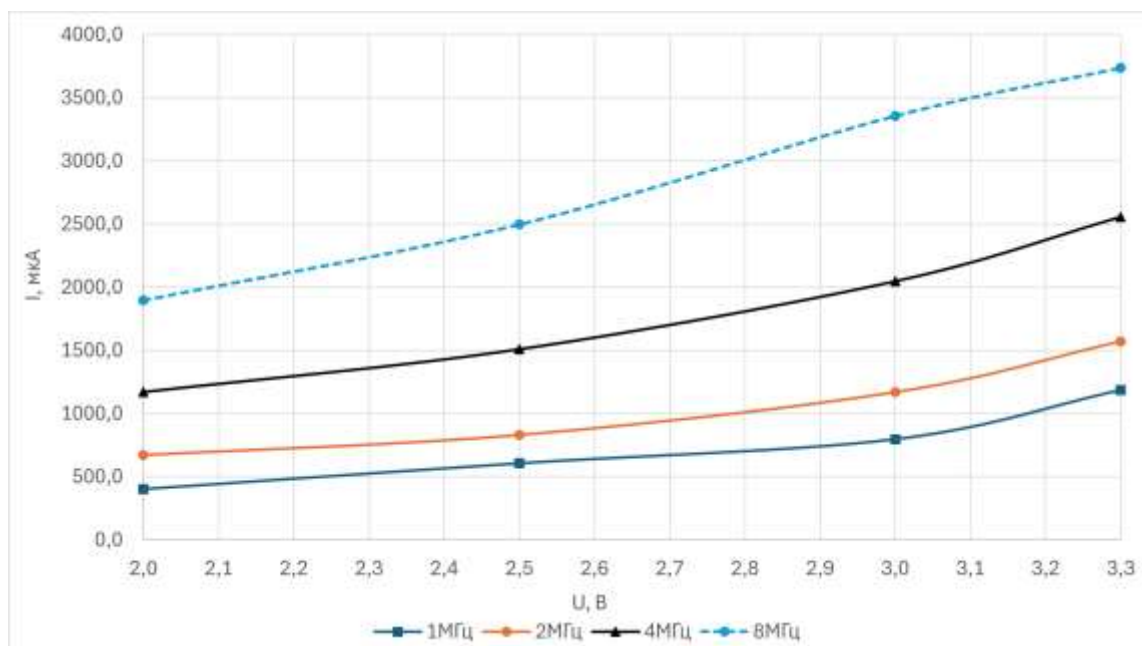


Рис. 5. Потребление выносного датчика в активном режиме при разных частотах тактирования

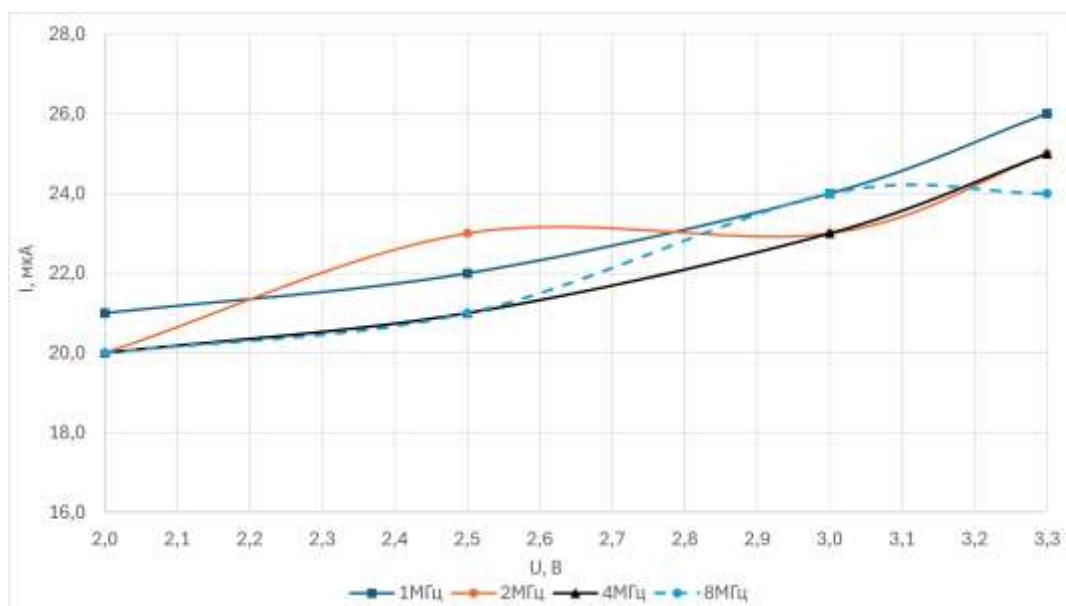


Рис. 6. Потребление выносного датчика в режиме сна при разных частотах тактирования

Конструкция. Плата покрыта двумя слоями электроизоляционного лака Plastik 71. Датчик размещён в экране Стивенсона собственной разработки: электронный блок находится в герметичном отсеке, а чувствительный элемент BME280 вынесен над крышкой для обеспечения свободного обдува воздухом. Прочностной расчёт в SolidWorks подтвердил устойчивость конструкции к ветровым и снеговым нагрузкам.



Рис. 7. Корпус и печатная плата выносного датчика

Заключение

Разработанная метеостанция представляет собой законченную систему: от полностью автономного уличного блока с пятилетней автономностью до информативной базовой станции с функциями прогноза осадков и атмосферной подсветки. Проект демонстрирует возможность создания функционального устройства на доступной элементной базе с применением методов глубокого энергосбережения и программной обработки сигналов

Список литературы

1. Ковалев А.С. Метеостанция на Atmega328 и NRF24L01 с выносным датчиком [Электронный ресурс]. - 2026. – URL: <https://habr.com/ru/articles/1013452/> (дата обращения 03.05.2026)

УПРАВЛЕНИЕ РОСТОМ КРИСТАЛЛОВ MAPbBr_3 МЕТОДОМ ЗАТРАВОЧНОЙ ОБРАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В АТМОСФЕРЕ СУХОГО ВОЗДУХА

КОВАЛЕВ М.О., ДЕГТЕРЕВ А.Э., ТАРАСОВ А.С., ИСАЕВ Ю.Е.

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

Аннотация. В работе исследовано влияние затравочной кристаллизации (seed-assisted growth) на морфологию и оптические свойства кристаллов бромида свинца-метиламмония (MAPbBr_3). Кристаллы выращивались методом обратной температурной кристаллизации (ИТС) в атмосфере сухого воздуха. Показано, что использование затравки позволяет подавить спонтанное зародышеобразование и получить кристаллы размером до $7 \times 7 \times 3$ мм. Проведен сравнительный анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ) кристаллов, выращенных спонтанно и с затравкой. Обнаружено, что кристаллы, выращенные с затравкой, демонстрируют в 1,9 раза более высокую интегральную интенсивность ФЛ и существенно меньшую (на 22%) полуширину пика (23,8 нм против 30,5 нм), что свидетельствует о более низкой плотности дефектов. Методом микроскопии ФЛ выявлено неоднородное распределение свечения в кристаллах с затравкой, связанное с дефектами на границе раздела и эффектом перепоглощения.

Ключевые слова: перовскит, кристалл, обратная температурная кристаллизация (ИТС), затравочная кристаллизация, фотолюминесценция.

Одним из перспективных материалов для оптоэлектроники являются галогенидные перовскиты, в частности MAPbBr_3 . Кристаллы этого материала обладают значительно

меньшей плотностью дефектов по сравнению с поликристаллическими пленками, что обеспечивает высокую подвижность носителей заряда и время их жизни [1]. Однако классический метод обратной температурной кристаллизации (ИТС) часто приводит к спонтанной нуклеации и росту множества мелких кристаллов с трудно контролируемой морфологией [2].

В данной работе предложена модификация метода ИТС, заключающаяся во введении в раствор прекурсоров затравочного кристалла (seed crystal) MAPbBr_3 . Синтез проводился в атмосфере сухого воздуха при комнатной температуре. Исходные реагенты – MABr и PbBr_2 в молярном соотношении 1:1 – растворялись в DMF с концентрацией 1 М. В качестве затравки использовался предварительно выращенный кристалл размером $1,5 \times 1,5 \times 1,0$ мм. Раствор нагревался от 55°C со скоростью 2°C каждые 20 минут до температуры начала активного обрастания затравки ($\sim 73^\circ\text{C}$), после чего проводилась изотермическая выдержка в течение 24 часов. Схематическое изображение технологии затравочного метода представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схематическая иллюстрация метода ИТС

Использование затравки позволило направить поток пересыщенного раствора на заданную поверхность, полностью подавив образование новых центров кристаллизации. В результате были получены единичные кристаллы кубической формы размером до $7 \times 7 \times 3$ мм, что в 1,5-2 раза превышает размеры спонтанно выращенных образцов (максимум $4 \times 3 \times 2$ мм). Внешний вид полученных кристаллов представлен на рис. 2.

Для оценки оптического качества образцов были измерены спектры стационарной фотолюминесценции при комнатной температуре (возбуждение лазером 405 нм). Сравнительный анализ спектров кристаллов, выращенных спонтанно и с затравкой, представлен на рис. 3. Кристаллы, выращенные с затравкой, демонстрируют существенно более высокую интенсивность фотолюминесценции и значительно более узкий пик. Полуширина (FWHM) основного пика для образца с затравкой составила 23,8 нм, что на 6,7 нм (22%) уже, чем у спонтанного образца (30,5 нм). Интегральная интенсивность ФЛ выше в 1,9 раза. Такое значительное улучшение параметров свидетельствует о более низкой плотности дефектов в кристаллической решетке и более высоком структурном совершенстве материала, выращенного с использованием затравки [3].

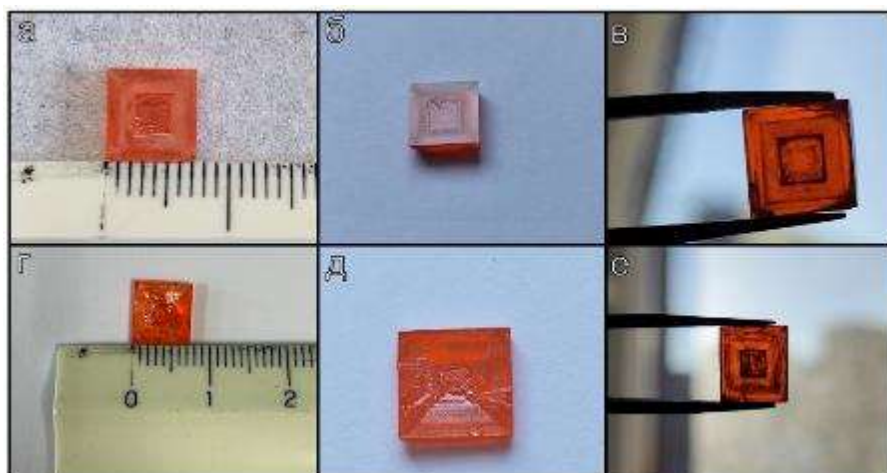


Рис. 2. Фотографии кристаллов MAPbBr_3 , выращенных с затравкой

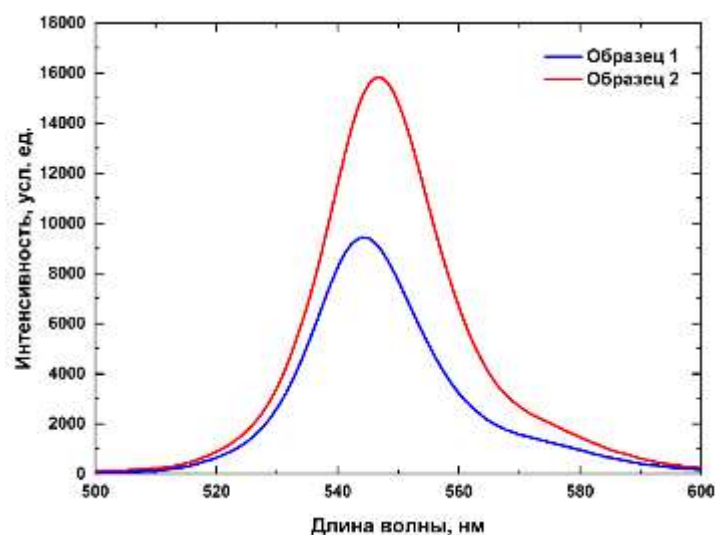


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции кристаллов MAPbBr_3 при комнатной температуре: Образец 1 – кристалл, выращенный спонтанно; Образец 2 – кристалл, выращенный с затравкой

Микроскопия фотолюминесценции (рис. 4) выявила неоднородное распределение свечения по поверхности кристаллов, выращенных с затравкой. В центральной области (зона расположения исходной затравки и границы раздела) наблюдалось понижение интенсивности ФЛ, тогда как периферийные области демонстрировали яркое и однородное свечение. Напротив, в спонтанно выращенных кристаллах тушение свечения преимущественно локализовано вблизи краев и на дефектных полосах, что связано с краевыми эффектами роста. Наблюдаемая неоднородность кристаллах, выращенных с затравкой, объясняется повышенной плотностью дислокаций несоответствия и микронапряжений на границе раздела «затравка-наросший слой» [4].

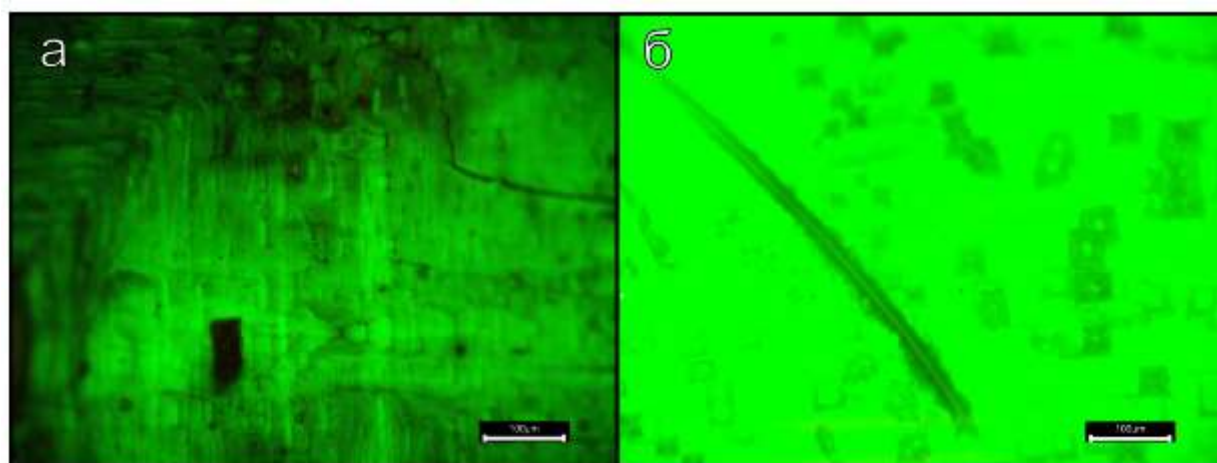


Рис. 4. Микрофотографии поверхности кристаллов MAPbBr_3 в режиме фотолюминесценции (увеличение 200×): а – кристалл, выращенный с затравкой; б – кристалл, выращенный спонтанно.

Таким образом, предложенный метод затравочной обратной температурной кристаллизации в атмосфере сухого воздуха позволяет воспроизводимо получать крупные (до 7 мм) высококачественные кристаллы MAPbBr_3 с улучшенными оптическими характеристиками: интегральная интенсивность ФЛ выше в 1,9 раза, полуширина пика уже на 22% по сравнению с образцами, выращенными без затравки. Выявленная в созданных кристаллах неоднородность фотолюминесценции указывает на необходимость дальнейшего улучшения качества исходных затравок и условий эпитаксиального выращивания. Полученные результаты важны для создания эффективных оптоэлектронных устройств (фотодетекторов, светодиодов) на основе кристаллических галогенидных перовскитов.

Исследование поддержано проектом № FSEE-2025-0013.

Список литературы

1. Shi, D. et al. Low trap-state density and long carrier diffusion in organolead trihalide perovskite single crystals. *Science* 347, 519–522 (2015).
2. Saidaminov, M. I. et al. High-quality bulk hybrid perovskite single crystals within minutes by inverse temperature crystallization. *Nat. Commun.* 6, 7586 (2015).
3. Wang, K.-H. et al. Structural and Photophysical Properties of Methylammonium Lead Tribromide (MAPbBr_3) Single Crystals. *Sci. Rep.* 7, 13643 (2017).
4. Efrati, A. et al. First evidence of macroscale single crystal ion exchange found in lead halide perovskites. *EcoMat* 2, e12016 (2020).

РАЗРАБОТКА УВЧ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ НА ПЛАНАРНЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Койгеров А.С., Власов П.А.

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

Аннотация. В работе приведены результаты моделирования эллиптического УВЧ-фильтра нижних частот пятого порядка на основе планарных сосредоточенных элементов. Предложена конструкция фильтра, выполненного с использованием комбинации из кристаллических подложек плавленого кварца и танталата лития. Приведены экспериментальные результаты измерения частотной характеристики изготовленного образца.

Ключевые слова: фильтр нижних частот, сосредоточенные элементы, пассивные элементы, моделирование, сапфир, танталат лития

Высокочастотные фильтры находят применение во множестве областей: в микроволновых схемах, системах спутниковой связи и наземных телекоммуникаций, аэрокосмической аппаратуры, систем радиолокации, в измерительных приборах и лабораторном оборудовании. Основной задачей фильтров нижних частот (ФНЧ) является с одной стороны, обеспечение прохождения сигналов с частотой ниже определенной частоты – частоты среза $f_{\text{ср}}$ – с минимальными вносимыми потерями и, с другой стороны, ослабление нежелательных сигналов с более высокой частотой, например, гармоник сигнала высоких порядков.

В текущее время большую популярность приобрели так называемые фильтры со ступенчатым изменением волнового сопротивления (stepped-impedance filters), и в первую очередь это полосковые и микрополосковые фильтры [1, 2]. Они широко применяются в полосковых конструкциях на относительно высоких частотах, к примеру, в СВЧ-диапазоне, благодаря простоте изготовления и проектирования и превосходным характеристикам. Менее жесткие требования со стороны технологии изготовления обеспечивают при этом более высокую точность получаемых характеристик. На низких частотах же преобладают фильтры на основе пассивных сосредоточенных компонентов [3]. Такие фильтры удовлетворяют ключевому требованию современной электроники – компактности. Обычно они выполняются с использованием доступной технологии печатных плат и дискретных компонентов поверхностного монтажа с высокой добротностью [4]. Однако с ростом рабочей частоты возрастает влияние различных паразитных параметров, присущих всем компонентам, а также уменьшается относительная точность изготовления номиналов элементов, что значительно осложняет их применение.

Практичным решением для среднего диапазона частот, например, для устройств УВЧ, где необходимо соблюсти баланс между компактными размерами, свойственными фильтрам на основе сосредоточенных элементов, и высокой точностью, характерной структурам на основе элементов с распределенными параметрами, является использование неких сосредоточенных или квазисосредоточенных элементов, изготавливаемых с высокой точностью, на роль которых подходят элементы, выполненные по планарной технологии с применением всех операций оптической фотолитографии: планарные катушки индуктивности и конденсаторы. С устранением разброса номиналов элементов и с использованием современных пакетов моделирования становится возможным избежать проблемы влияния паразитных параметров, интегрируя их в часть самой схемы фильтра. Расчет номиналов идеальных элементов фильтра является тривиальной задачей для существующего множества программ оценки АЧХ, однако компенсация паразитных параметров осуществима только при электромагнитном моделировании с дальнейшей оптимизацией топологии конструкции.

Для разработки выбрана схема эллиптического фильтра нижних частот, которая представляет собой каскад из Т-образных звеньев, в которых присутствует последовательное соединение катушек и конденсаторов [5, 6]. Выбор данной схемы ФНЧ обусловлен минимальными потерями в полосе пропускания при высоком затухании в полосе заграждения и малыми габаритами готового устройства. На рисунке 1 изображена схема эллиптического фильтра пятого порядка, состоящая из семи элементов, где паразитная последовательная индуктивность конденсаторов использована в элементах L_4 и L_5 .

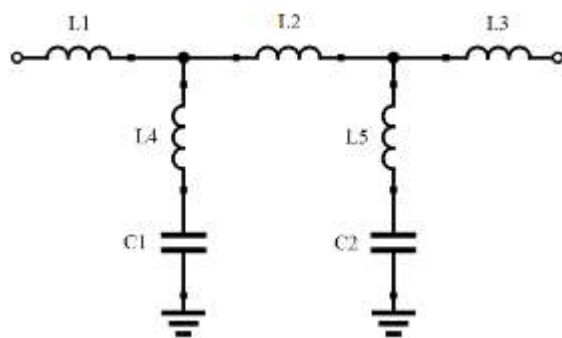


Рис. 1. Принципиальная схема эллиптического фильтра нижних частот пятого порядка

На рисунке 2 представлен изготовленный экспериментальный образец, состоящий из кристалла плавяного кварца с $\epsilon = 3,7$ с катушками индуктивности и кристалла танталата лития с $\epsilon = 50$, соединенных воздушными мостиками, смонтированных на печатную плату. Номиналы элементов равны $L_1 = L_3 = 8,1$ нГн, $L_2 = 16,4$ нГн, $L_4 = L_5 = 2,9$ нГн и $C_1 = C_2 = 3,2$ пФ.

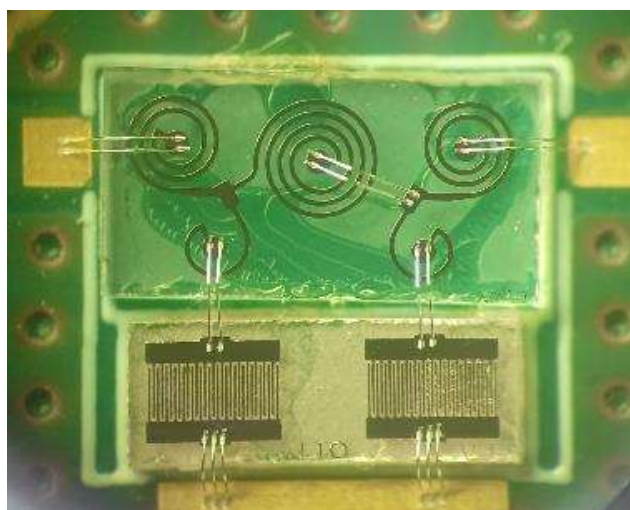


Рис. 2. Изготовленный образец

На рисунке 3 приведены теоретические результаты моделирования ФНЧ с учетом паразитных параметров и экспериментальные результаты измерения АЧХ изготовленного фильтра.

Результаты измерений оказались приближенными к результатам моделирования. Фактическая частота среза оказалась ниже ожидаемой на 20 кГц. Скачок S_{11} на графике на низких частотах обусловлен особенностями калибровки. Габариты устройства составили $5 \times 4,5$ мм. Использование конструкции из двух подложек с различной диэлектрической проницаемостью позволило одновременно подавить возникновение паразитных емкостей катушек и сохранить малые размеры конденсаторов, а также обеспечить оптимальную толщину металлизации на разных кристаллах.

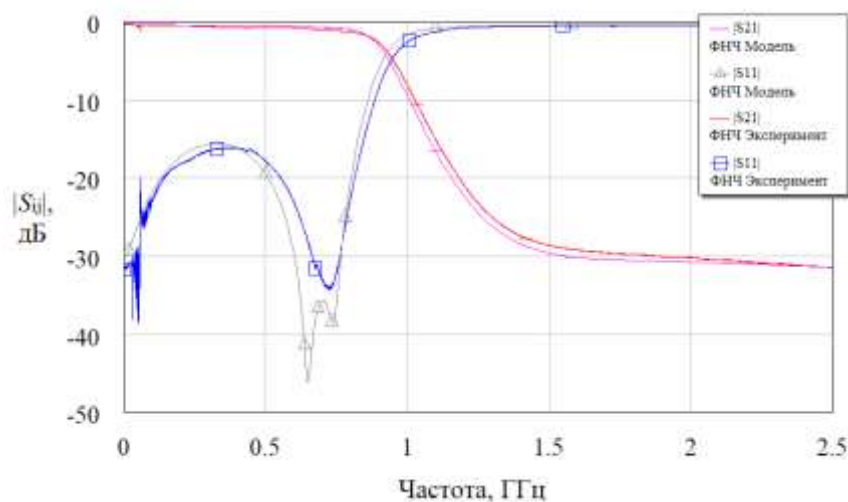


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики модели фильтра и экспериментального образца

Благодарности

Автор выражает благодарность генеральному директору – главному конструктору ООО «АЭК Дизайн» Реуту В.Р. за предоставление экспериментальных данных.

Список литературы

1. Hong J., Lancaster M.J. Microstrip filters for RF/microwave applications. New-York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 488 p.
2. Ayibapreye K. B., Priye K. A., Animiosevbuse T. E. / Stepped Impedance Microstrip Lowpass Filter Design using Advanced Design Systems // International Journal of Scientific and Research Publications. 2021, vol. 11, iss 7. P. 371-376.
3. D. Natarajan, A Practical Design of Lumped, Semi-Lumped and Microwave Cavity Filters, Lecture Notes in Electrical Engineering. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 140 p.
4. Bahl I. J. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Boston: Artech House microwave library, 2003. 488 p.
5. Design of UHF Elliptic Function Filter for Wireless Applications / H. F. Liew, S.I.s. Hassan, M. F. Abd Malek et al. // International Conference On Engineering And Management (IPCEM), Kuala Lumpur, Malaysia, 25-26 Jan. 2014 / Universiti Malaysia Perlis (UniMAP), Malaysia, 2014, P. 1-10.
6. Das T. K., Chatterjee S. Design of a Finite Attenuation Pole Miniaturized S-band Lowpass Filter Using Elliptic Function / International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering, Bhubaneswar, India, 18-20 Dec. 2015, / IIT Bhubaneswar, India, 2015, P. 404-407.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОФЛЮИДНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ СИЛЫ ЛОРЕНЦА, ИНТЕГРИРУЕМОГО В ЛАБОРАТОРИЮ-НА-ЧИПЕ ДЛЯ СПЕКЛ-АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ К АНТИБИОТИКАМ

КОМАРОВ А.А., СИБГАТОВ Р.Р.

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

Аннотация. Работа посвящена разработке и исследованию микрофлюидного смесителя, функционирующего на основе силы Лоренца, для интеграции в лаборатория-на-чипе. Описана технология изготовления медных электродов методом фотолитографии на текстолите с последующей покрытием поверхности графитом для повышения химической стойкости. Экспериментально определен оптимальный режим работы устройства, обеспечивающий эффективное разрушение ламинарных потоков без

интенсивного электролиза. Предложенное решение позволяет оптимизировать этап пробоподготовки для последующего спекл-анализа жизнеспособности бактерий, что открывает возможности для экспресс-диагностики в клинических условиях.

Ключевые слова: Микрофлюидный смеситель, сила Лоренца, магнитогидродинамика (МГД), лаборатория на чипе, спекл-анализ, антибиотикорезистентность.

При лечении острых инфекционных заболеваний время начала эффективной антибиотикотерапии является критическим фактором, определяющим жизнь пациента. Однако существующие автоматические системы для микробиологического анализа, применяемые в клинко-диагностических лабораториях, требуют в среднем 6–16 часов на получение результата, а предварительный этап пробоподготовки (выделение чистой бактериальной культуры) занимает 24 часов и более [1]. В результате столь длительного ожидания врачи вынуждены назначать антибиотики эмпирически, что приводит к ряду негативных последствий: неэффективность терапии и ухудшение состояния пациента, рост устойчивости микроорганизмов к препаратам, увеличение сроков госпитализации и затрат на лечение. Таким образом, существует острая потребность в сокращении времени определения антибиотикорезистентности непосредственно из клинического образца.

Разрабатываемый в нашей научной группе прибор позволяет получать результат определения антибиотикорезистентности менее чем за час непосредственно из клинического образца. Это достигается за счет использования метода анализа кинетики спекл-паттернов лазерного излучения, рассеиваемого бактериальной суспензией. Характер спекл-структуры меняется при изменении жизнеспособности микроорганизмов под действием антибиотиков, что регистрируется в реальном времени. Для проведения таких исследования требуется добавить к суспензии микроорганизмов раствор антибиотика. Однако, процесс смешивания в микрофлюидных устройствах представляет собой сложную задачу из-за ламинарных потоков в микроканалах, возникающих из-за низких чисел Рейнольдса, определяемых малым диаметром канала, низкой скоростью потока.

Для оптимизации процесса смешивания разрабатывается микрофлюидный магнитогидродинамический (МГД) смеситель на основе силы Лоренца, который позволит повысить эффективность смешивания. МГД миксер относится к активным методам смешивания и направлен на разрушение ламинарного потока, изменяя его направление, что позволяет создавать сложные вторичные потоки, деформировать и растягивать границы раздела жидкостей [2].

Миксер выполнен в планарном варианте и состоит из резервуара, по периметру которого нанесён электрод, а второй электрод расположен в центре. Схема электродов и распределение полей в образце представлены на рисунке 1. Система находится в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, расположенным под системой. Магнитные линии направлены ортогонально плоскости резервуара. При подаче разности потенциалов между электродами начинает протекать электрический ток. Возникающая под действием взаимодействия электрического тока с магнитным полем сила Лоренца приводит к циркуляции потока жидкости, содержащей ионы. При подаче напряжения полярностью, соответствующей рисунку 1, будет наблюдаться движение жидкости против часовой стрелки.

Закон Ома для движущейся электропроводной жидкости (электролита) с проводимостью σ в магнитном поле

$$J = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) = \sigma(-\vec{\nabla}V + \vec{u} \times \vec{B}),$$

где J – плотность тока, E – напряжённость электрического поля, u – вектор скорости жидкости, B – вектор магнитной индукции, V – электрический потенциал.

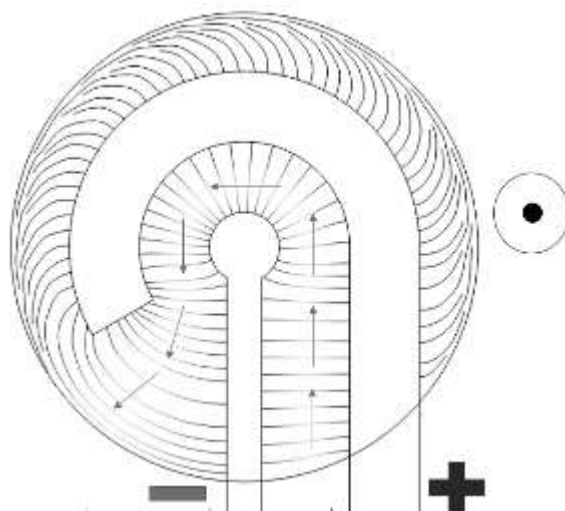


Рис.1. Распределение электрического и магнитного полей в образце и направление потока жидкости

Сила Лоренца возникает при взаимодействии плотности тока J и индукции магнитного поля: $F = J \times B$ [3].

Технология изготовления электродов включает метод фотолитографии и нанесение слоев электропроводного углеродного композита. В качестве материала подложки используется текстолит с нанесённым медным покрытием и слоем негативного фоторезиста AQUA MER ME720. Фотошаблон изготовлен методом шелкографии. Экспонирование фоторезиста по фотошаблону проводилось УФ излучением с длиной волны 365 нм. Растворение неэкспонированных участков фотошаблона с помощью Na_2CO_3 . Стравливание незащищённых участков меди проводили с помощью раствора перекиси водорода и лимонной кислоты. Удаление оставшегося слоя фоторезиста проводили с помощью 5% раствора NaOH .

Электроды в области своей активной работы с образцом были покрыты графитом, так как медь легко вступает в реакции и окисляется. Выделяемые при этом продукты могут быть опасны для бактерий, анализируемых в системе. Графит инертен, служит защитным барьером, предотвращая растворение электродов и загрязнение пробы ионами меди. Также графит способствует минимизации образования пузырьков на электродах, которые могут блокировать микроканалы, нарушая направленный поток, создаваемый силой Лоренца [4]. Фотошаблон и полученный в результате чип представлены на Рис. 2, А, Б.

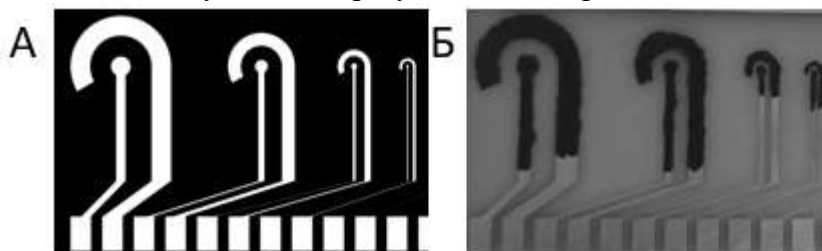


Рис. 2. Топология проводящего слоя. А – Фотошаблон, Б – Изготовленный образец с нанесённым графитовым покрытием

В ходе эксперимента на электроды подавался импульсный сигнал, форма которого представлена на Рис. 3. В качестве маркера смешивания использовали метиленовый красный, который добавляли в физраствор.

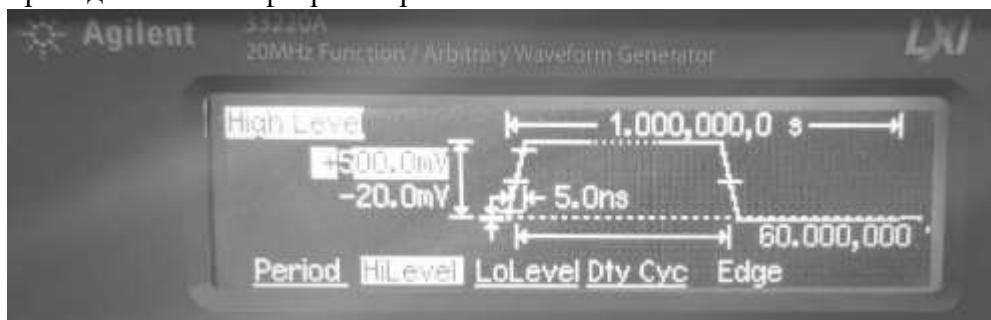


Рис. 3. Форма подаваемого сигнала

При отсутствии напряжения движение в растворе не наблюдается. При повышении напряжения от 1 до 3 В движение незначительно, перемещаются мелкие частицы в образце, что соответствует Рис. 5, А. При напряжениях от 4 до 6 В наблюдается активное вращение жидкости с образованием вихрей и перемешивание компонентов смеси, что показано на Рис. 5, Б. При дальнейшем повышении напряжения начинается активное образование пузырьков, что свидетельствует о начале электролиза, что видно на Рис. 5, В. Дальнейшее увеличение напряжения может привести к гибели микроорганизмов в суспензии. Таким образом эффективное смешивание достигается при напряжении 4-6 В в течение четырёх секунд.

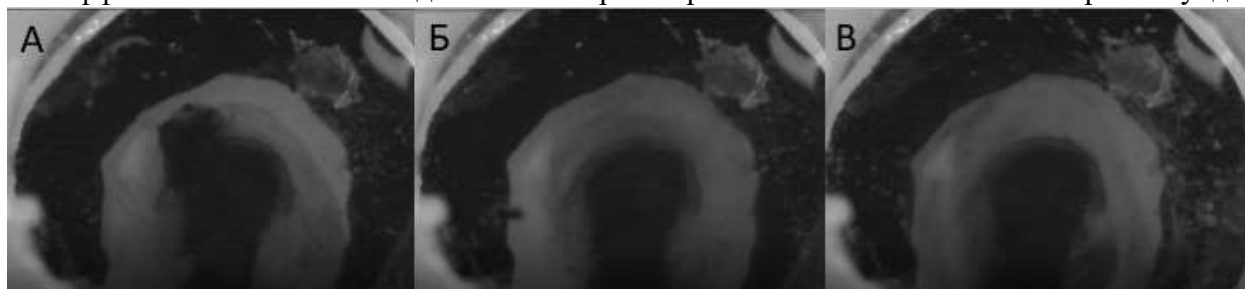


Рисунок 5 – Работа смесителя при различных напряжениях. А – 1-3 В, Б – 4-6 В, В – более 6 В

Таким образом была разработана топология электродов и технология их изготовления методом фотолитографии, предназначенная для создания МГД-поток в микроканалах. Определен оптимальный рабочий диапазон напряжений, обеспечивающий активное перемешивание суспензии без химического или термического повреждения микроорганизмов. Интеграция данного смесителя в систему спекл-анализа позволит сократить время пробоподготовки.

Приносим благодарность нашему научному руководителю к.ф.-м.н., доценту кафедры МНЭ Зиминой Татьяне Михайловне.

Список литературы

1. Behera B. et al. Emerging technologies for antibiotic susceptibility testing //Biosensors and Bioelectronics. – 2019. – V. 142. – P. 111552.
2. Ward K., Fan Z. H. Mixing in microfluidic devices and enhancement methods //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2015. – V. 25. – №. 9. – P. 094001.
3. Yi M., Qian S., Bau H. H. A magnetohydrodynamic chaotic stirrer //Journal of Fluid Mechanics. – 2002. – V. 468. – P. 153-177.
4. Kaprou G. D. et al. Rapid methods for antimicrobial resistance diagnostics //Antibiotics. – 2021. – V. 10. – №. 2. – P. 209.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СВОЙСТВ ALGaAs/GaAs ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С КОНТАКТНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА AuGe

КОМПАНИЕЦ В.М., РОМАНЧУК А.К., СОЛДАТЕНКОВ Ф.Ю., МАЛЕВСКАЯ А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию резистивных свойств AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с контактной системой на основе эвтектического сплава AuGe с целью снижения последовательного сопротивления приборов. Проведено исследование влияния конфигурации омических контактов на основе напыленных слоев NiCr/AuGe/NiV/Au с электрохимическим наращиванием Ag/Ni/Au (при варьировании толщины и шага расположения контактных шин) на последовательное сопротивление фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения путем измерения темновых вольт-амперных характеристик и карт электролюминесценции. Полученные значения последовательного сопротивления приборов составили $\sim 6.5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, омический контакт, эвтектический сплав AuGe, последовательное сопротивление.

Введение.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры с длиной волны излучения 800-860 нм являются одним из центральных элементов систем беспроводной передачи энергии, которые служат для безопасного электропитания устройств во взрыво- и пожароопасных средах, аппаратуры для мониторинга высоковольтных линий, датчиков с молниезащитой и прочих [1].

Одним из ключевых элементов, определяющих величину резистивных потерь полупроводниковых приборов, является контакт к полупроводнику. Для формирования контакта к GaAs n-типа проводимости традиционно применяется система на основе эвтектического сплава AuGe. Несмотря на многолетнюю историю использования контактной системы AuGe/Ni/Au, оптимизация её состава и режимов вжигания остаётся предметом активных исследований. В частности, в работе [2] показано, что формирование зёрен NiAsGe на границе раздела с полупроводником при температурах выше 350 °C обеспечивает минимальное переходное контактное сопротивление.

Целью работы являлась оптимизация конструкции и технологии формирования лицевой контактной структуры к AlGaAs/GaAs ФЭП ЛИ для минимизации последовательного сопротивления. Для её достижения были решены следующие задачи:

1. Исследована контактная система на основе AuGe с адгезионными и барьерными слоями, содержащими сплавы NiCr и NiV;
2. Рассмотрена различная конфигурация контактных шин с гальваническим проводящим слоем различной толщины;
3. Проведена диагностика морфологии и толщины полученных контактных структур методами оптической микроскопии и стилусной профилометрии. Осуществлен контроль контактного сопротивления на границе металл/полупроводник методом TLM (Transmission Line Method) [3];
4. Измерены темновые вольт-амперных характеристик (ВАХ) и получены карты электролюминесценции (ЭЛ) ФЭП ЛИ для анализа влияния конфигурации контактных систем на последовательное сопротивление приборов.

Особенности конфигурации контактных систем.

Были изготовлены ФЭП ЛИ на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs p-типа проводимости. Сформирован сплошной тыльный контакт на основе слоев NiCr/Ag/Au и лицевой на основе контактной системы NiCr/AuGe/NiV/Au, каждый толщиной ~ 0.2 мкм. Вжигание лицевого и тыльного контактов проводилось при 370°C в течение 1 минуты.

Выбор конфигурации лицевой контактной системы NiCr/AuGe/NiV/Au обусловлен тем, что применение AuGe позволяет изготавливать омические контакты к n-GaAs с низким сопротивлением; добавление NiCr в качестве первого слоя контакта улучшает адгезию, морфологию и термическую стабильность границы раздела металл/полупроводник, а также ведет к снижению глубины диффузии металла в полупроводник [4,5]. Как известно из литературных данных [6], при вжигании контактов AuGe/Ni/Au на GaAs происходит взаимная диффузия компонентов слоев контакта и полупроводника с образованием соединений: на начальном этапе (более 100°C) Ni начинает растворяться в слое AuGe, а при дальнейшем нагреве до 350°C , и выше, формируются фаза AuGa и зерна NiAs, содержащие Ge, с промежуточным образованием Ni_3Ge ; зерна NiAs, соприкасающиеся с GaAs, обеспечивают омическое поведение контакта [2]. Второй слой с никелем, NiV, также необходим для замедления диффузии золота из верхнего слоя контакта к границе с полупроводником.

Для увеличения электрической проводимости контактов выполнено электрохимическое осаждение слоев Ag/Ni/Au. Обоснование выбора серебра в качестве материала для основного проводящего слоя продиктовано его уникальным сочетанием свойств: Ag обладает наивысшей электропроводностью ($\sim 6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) среди металлов (уступая лишь Cu), а также высокой технологичностью при электроосаждении (выход по току близок к 100%; химическая инертность электролита способствует совместимости с фотолитографическими процессами). Для защиты серебра от окисления сверху наносится барьерный слой Ni и Au, что помогает также и при монтаже приборов.

Были изготовлены две группы образцов при варьировании толщины контактных шин от 2 до 8 мкм и расстояния между контактными шинами 100–140 мкм (рис. 2). Диапазон толщины и величина шага шин выбраны с учётом компромисса между оптическими и резистивными потерями: величиной затенения фотоактивной поверхности и последовательным сопротивлением ФЭП ЛИ.

Методы диагностики контактных систем.

На оптическом микроскопе осуществлялась визуальная оценка морфологии поверхности. С помощью стилусного профилометра производилось измерение толщин лицевого контакта и гальванически осаждённого проводящего слоя.

Контроль резистивных свойств контактов осуществлялся методом TLM с прямоугольной геометрией контактных площадок на тестовых образцах, представляющих собой эпитаксиальный слой GaAs с высоким уровнем легирования n- или p-типа проводимости, выращенный на полуизолирующих подложках GaAs. Величина поверхностного сопротивления R_s , характеризующего функциональные свойства проводящего слоя, находится в диапазоне 85-105 Ом/□ для структуры n-типа проводимости и 350-430 Ом/□ – для p-типа. Основной параметр, характеризующий омический контакт – удельное контактное сопротивление ρ_c , величины которого находились в диапазоне $(1\div 3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для обеих систем.

Формирование меза-структуры в фотопреобразователе осуществлялось методом жидкостного травления в растворе бихромата калия и бромистоводородной кислоты

($K_2Cr_2O_7:HBr$). Данный травитель относится к окислительно-восстановительным системам, характеризуется высокой скоростью травления и низкой селективностью по отношению к III–V соединениям, что требует строгого контроля времени процесса [7].

Резистивные характеристики ФЭП ЛИ.

Для количественной оценки последовательного сопротивления прибора были измерены темновые ВАХ ФЭП ЛИ размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Измерение проводилось в импульсном режиме тока для предотвращения нагрева ФЭП. Оценка последовательного сопротивления приборов проводилась по отклонению измеренной ВАХ от идеализированной прямой в области высоких токов (до 1000 мА), где вклад омических потерь становится доминирующим. Увеличение толщины гальванического слоя от 2 до 8 мкм привело к росту поперечного сечения проводящих шин, что обратно пропорционально сказалось на снижении последовательного сопротивления приборов от $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $6,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

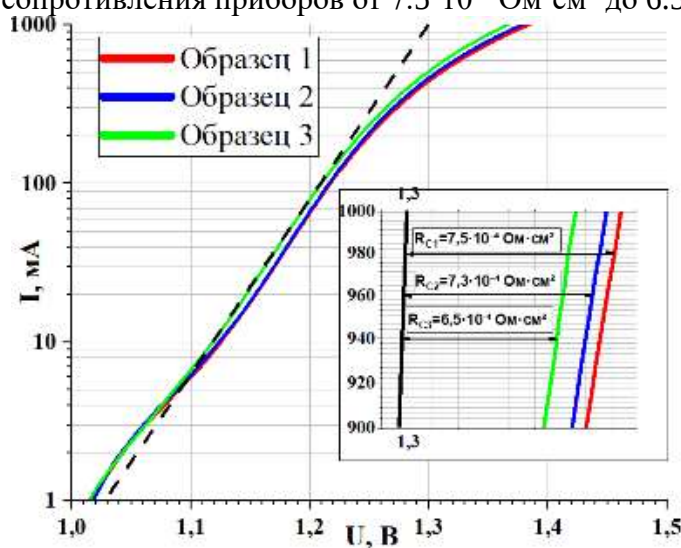


Рис. 1. Темновые ВАХ AlGaAs/GaAs ФЭП размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$ (шаг контактной сетки 100 мкм) при толщине контактных шин: Образец 1 – 2 мкм; Образец 2 – 5 мкм; Образец 3 – 8 мкм.

Следует отметить, что итоговая величина последовательного сопротивления определяется совокупностью факторов, из которых гальваническое утолщение является финальным этапом оптимизации. Ключевую роль в достижении низких значений последовательного сопротивления играет предварительная оптимизация топологии контактной сетки (уменьшение шага сетки и ширины шин для минимизации потерь на растекание), выбор материалов напылённых слоёв, обладающих низким удельным контактным сопротивлением к GaAs, эффективными барьерными свойствами против взаимной диффузии металлов и полупроводника, хорошей адгезией к подложке и последующим слоям, а также толщины слоя растекания в полупроводниковой структуре.

Были получены карты ЭЛ при пропускании через образцы постоянного тока величиной 200 мА. Равномерная электролюминесценция ФЭП свидетельствует о низком сопротивлении в полупроводниковом слое растекания и оптимальной конфигурации контактных систем (рис. 2).



Рис. 2. Карты электролюминесценции ФЭП ЛИ (200 мА)

Заключение: В ходе работы исследована контактная система NiCr/AuGe/NiV/Au на основе эвтектического сплава AuGe, в которой тонкий слой NiCr применялся для улучшения адгезии контакта к полупроводнику. Удельное контактное сопротивление ρ_c структуры NiCr/AuGe/NiV/Au к n-GaAs составило $(1-3) \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Установлено, что увеличение толщины гальванического Ag-слоя до 8 мкм приводит к снижению последовательного сопротивления прибора до $6.5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² и равномерному растеканию тока, что доказывается однородной электролюминесценцией. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологии изготовления высокоэффективных фотопреобразователей лазерного излучения.

Список литературы

1. C. Algora, I. Garcia, M. Delgado, R. Pena, C. Vazquez, M. Hinojosa, I. ReyStolle. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light // Joule. – 2022. – Vol. 6, №. 2.
2. Sung-Dae Kim, Dongsu K, Young-Woon Kim. Investigation of the low contact resistance via alloying of Au/Ni/AuGe-GaAs contact structures. Materials Letters 318 (2022) 132140. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132140>;
3. S. Guo, G. Gregory, A.M. Gabor, W.V. Schoenfeld, K.O. Davis, Detailed investigation of TLM contact resistance measurements on crystalline silicon solar cells, Sol. Energy 151 (15) (2017) 163–172, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.015>;
4. Bo Li, Hui Li, Xiaoxue Li, Hao Yan, Yongqin Hao. GaAs Ohmic Contact Process with Cr Barrier Layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(11): 11030013;
5. Патент № 2756171 С1 Российская Федерация, МПК H01L 31/05 (2014.01), B82B 1/00 (2006.01). Фотоэлектрический преобразователь : № 2021108281 : заявл. 26.03.2021 : опубл. 28.09.2021 / Солдатенков Ф.Ю., Малевская А.В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (RU). – Бюл. № 28;
6. Kim, T.; Chung, D.D.L. Transmission electron microscopy study of the interfacial reactions in gold-based contacts to gallium arsenide. Philos. Mag. A 1990, 62, 283–317, <https://doi.org/10.1080/01418619008242505>.
7. Clawson A. R. Guide to references on III–V semiconductor chemical etching // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2001. – Vol. 31. – P. 1–438.

ОСОБЕННОСТИ 4F-ФОТОЭМИССИИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР O2-YB-SI(111)

КОТЕНКО Р.П.¹, КУЗЬМИН М.В.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина), факультет электроники, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Показано, что в фотоэлектронных 4f-спектрах трехвалентного иттербия в пленочных структурах O_2 -Yb-Si(111) может наблюдаться, помимо основной линии, особенность, обусловленная двухвалентными атомами. Показано, что эта особенность обусловлена эффектами встряхивания при фотоионизации 4f-оболочки. Ее интенсивность монотонно увеличивается с энергией возбуждения. Рассмотрен механизм процесса встряхивания в указанных структурах, который объясняет наличие порога на зависимости интенсивности линий-спутников от энергии фотонов. Полученные результаты важны, в частности, для проведения корректных оценок валентности атомов редкоземельных металлов по форме фотоэмиссионных спектров.

Ключевые слова: иттербий, фотоэлектронная спектроскопия, валентный переход, встряхивание

По мере уменьшения характеристических размеров материалов все более существенную роль играют явления, происходящие на их поверхности. В связи с этим значительный интерес в последнее время получили нанoadсорбенты [1], физико-химические свойства которых могут быть модифицированы направленным образом при помощи адсорбированных слоев. Так, в недавних работах [2,3] было показано, что в пленках редкоземельного металла иттербия нанометровой толщины (от 0.4 до 20–30 nm) при адсорбции различных молекул (CO , O_2 или NH_3) может происходить валентный переход $Yb^{2+} (4f^{14}6s^2) \rightarrow Yb^{3+} (4f^{13}5d^16s^2)$, сопровождаемый также изменением целого ряда свойств (электронных, структурных, электрических и каталитических) нанопленок.

Как известно, для определения валентного состояния иттербия наиболее широко применяется фотоэлектронная спектроскопия [4]. Это объясняется тем, что в фотоэлектронных спектрах 4f-уровня этого элемента особенности, обусловленные двух- и трехвалентными атомами, полностью разнесены на шкале энергий, что позволяет использовать форму 4f-линии в качестве «отпечатка пальцев» (fingerprints) среднего значения валентности. В недавней работе [5], однако, было показано, что рентгеновские фотоэлектронные спектры, полученные для нанопленок трехвалентного иттербия разной толщины, могут содержать как особенность, соответствующую Yb^{3+} (конечное состояние $4f^{12}$), так и особенность, соответствующую Yb^{2+} (конечное состояние $4f^{13}$). Природа последней до сих пор не вполне ясна. Прояснение причин появления этой линии в 4f-спектрах трехвалентного иттербия имеет фундаментальное значение, а также необходимо для повышения надежности определения валентности редкоземельных металлов из фотоэлектронных спектров.

Целью данной работы было выяснить, какие физические процессы обуславливают появление линии Yb^{2+} в фотоэлектронных 4f-спектрах пленок трехвалентного иттербия. Эксперименты проводились на экспериментальной станции НАНОФЭС специализированного источника синхротронного излучения КИСИ-Курчатов (г. Москва). Спектры иттербия регистрировались с помощью полусферического анализатора SPECS Phoibos 225 при комнатной температуре и нормальном угле выхода электронов из образца. Энергия возбуждения $h\nu$ изменялась в интервале 108–900 eV. Полное энергетическое разрешение в этом интервале составляло ~ 0.10 – 0.25 eV. В качестве мишени использовались образцы, приготовленные следующим образом. Нанопленки иттербия наносились на предварительно очищенную подложку Si(111)(7×7) при температуре 295 K (толщина пленок составляла 6.1 nm, или 16 моноатомных слоев). Затем на поверхности нанопленок производилась недиссоциативная адсорбция кислорода. Доза составляла 100 Лэнгмюр, что позволяло получить полностью заполненный мономолекулярный адсорбированный слой кислорода на иттербии. Далее для такой структуры проводились измерения с помощью фотоэлектронной спектроскопии.

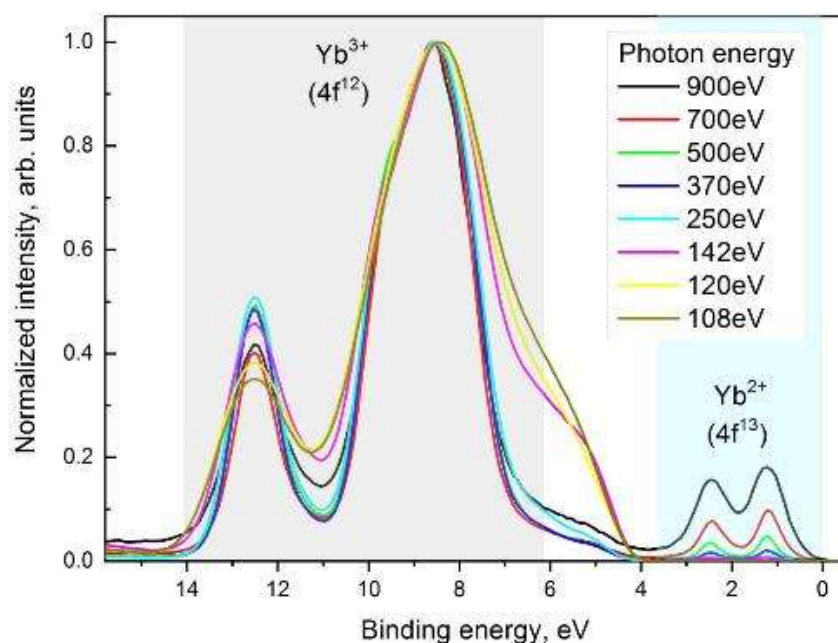


Рис. 1. 4f-спектры иттербия при различных энергиях фотонов

На рис. 1 представлены нормированные 4f-спектры для системы O_2 -Yb-Si(111), полученные при различных энергиях возбуждения. Эти спектры включают несколько характерных линий. Мультиплетная структура, наблюдающаяся в области энергий от 6 до 14 eV (нулевая энергия соответствует уровню Ферми), обусловлена эмиссией из атомов Yb^{3+} (конечное состояние $4f^{12}$). Дублет, который появляется при энергиях ~ 1.2 и 2.45 eV, обусловлен атомами Yb^{2+} (конечное состояние $4f^{13}$). Характерной особенностью этого дублета является то, что его интенсивность монотонно зависит от энергии возбуждения. Максимальная величина сигнала от двухвалентного иттербия наблюдается при $h\nu = 900$ eV. По мере уменьшения значения энергии фотонов интенсивность дублета падает. Полностью же он исчезает из спектров при $h\nu \sim 130$ -140 eV.

Для объяснения полученных результатов были рассмотрены две модели. Согласно одной из них, валентный переход $2+ \rightarrow 3+$ в иттербии распространяется не на всю глубину нанопленки. В этом случае верхний слой пленки образован трехвалентными атомами, а нижний – двухвалентными. Если толщина верхнего слоя меньше глубины выхода электронов из образца, то 4f-спектры должны включать обе линии, Yb^{3+} и Yb^{2+} , а интенсивность последней должна быть функцией энергии возбуждения (т.е., кинетической энергии фотоэлектронов). Количественный анализ, проведенный в рамках этой модели, показал, что она не может объяснить зависимость величины сигнала двухвалентного иттербия от энергии $h\nu$ на рис. 1. На этом основании данная модель была отвергнута.

Согласно другой модели, нанопленка целиком состоит из трехвалентных атомов иттербия. При взаимодействии с падающими фотонами атомы могут переходить в возбужденное состояние, из которого происходит испускание фотоэлектронов (“встряхивание” (shake-up)). Для атомов Yb^{3+} в структуре O_2 -Yb-Si(111) возбужденным является состояние

Yb^{2+} с электронной конфигурацией $4f^{14}6s^2$. Это и приводит к появлению дублета в спектрах 4f-эмиссии в области энергий ~ 1.2 и 2.45 eV. В докладе данный механизм встряхивания также обсуждается в контексте других механизмов, описанных в литературе.

В работе было проведено дальнейшее обоснование механизма встряхивания в системе $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$, предложенного выше. Следует отметить, что этому процессу могут способствовать сразу несколько факторов, характерных для данной системы. Прежде всего, двух- и трехвалентные состояния в иттербии почти вырождены по энергии; различие между ними составляет очень незначительную величину (~ 0.2 eV [5]). Во-вторых, трехвалентное состояние, наблюдаемое для нанопленок иттербия, является неавтономным и стабилизируется в результате образования донорно-акцепторной связи адсорбированных молекул с поверхностью нанoadсорбента. При этом молекулы адсорбата, в конечном счете, выступают как акцепторы электронов, что является движущей силой валентного перехода $2+ \rightarrow 3+$ в нанoadсорбенте. Наконец, в иттербии существенную роль играют обменно-корреляционные эффекты, что является важным условием для процессов встряхивания при фотоионизации внутренних уровней.

Для объяснения энергетической зависимости интенсивности дублета Yb^{2+} на рис. 1 и, в частности, существования на ней порога в области ~ 140 eV, проведено сравнение формы линии этого дублета с формой аналогичной линии для системы $\text{Yb-Si}(111)$, в которой иттербий имеет валентность, равную двум. Такой анализ показал, что фотовозбужденное состояние атомов иттербия в структурах $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ имеет очень малое время жизни; лоренцевская ширина линии для него в пять-шесть раз превышает аналогичное значение для 4f-линии обычного двухвалентного металлического иттербия в системе $\text{Yb-Si}(111)$. Это хорошо согласуется с существованием порога на энергетической зависимости интенсивности линии Yb^{2+} в системе $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что линия двухвалентного иттербия для структур $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ обусловлена эффектом встряхивания атомов и переходом $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ при их взаимодействии с фотонами. Интенсивность линии Yb^{2+} монотонно увеличивается с ростом энергии абсорбируемых фотонов. Указанная зависимость имеет порог в области энергий ~ 140 eV. Этот порог связан с тем, что время жизни возбужденного состояния при переходе $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+}$ заметно меньше характерных времен жизни возбужденных состояний при обычной фотоэмиссии с 4f-уровня.

Список литературы

1. Saleh, T.A. Surface science of adsorbents and nanoadsorbents. In: Interface Science and Tecnology. Elsevier, Academic Press (London), 2022. p. 324.
2. Митцев М.А., Кузьмин М.В., Логинов М.В. Механизм валентного перехода $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$, происходящего в нанопленках иттербия при хемосорбции на их поверхности молекул CO и O2 // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 10. С. 2054–2058.
3. Кузьмин М.В., Митцев М.А., Сорокина С.В. Влияние двойного электрического слоя на адсорбционные и каталитические свойства поверхности нанопленок иттербия // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 6. С. 829–835.
4. Wigren C., Andersen J.N., Nyholm R., Karlsson U.O. Growth and epitaxy of Yb silicides on Si(111) // J. Vac. Sci. Technol. A, 1991. V.9. No. 3. P. 1942-1945.
5. Кузьмин М.В., Митцев М.А. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия нанопленок иттербия с адсорбированным на их поверхности кислородом // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. № 7. С. 874-879.

АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДИЗАЙН СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА

КОТЛЯРОВА В. С., КРАСНИКОВА М. М., МАКАРОВА О. Г., НАЛИМОВА С. С.

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

Аннотация. В работе представлены результаты гидротермального синтеза наностержней ZnO для газочувствительных систем. Рассмотрены ключевые ограничения полупроводниковых сенсоров (селективность, рабочая температура, дрейф сигнала). Обоснованы пути их решения: создание многокомпонентных оксидных систем, увеличивающих концентрацию кислородных вакансий, и формирование MOF-оболочки, обеспечивающей эффект молекулярного сита. Предложена многоуровневая архитектура «ядро-оболочка» как перспективная платформа для селективного и быстродействующего газового анализа.

Ключевые слова: наностержни, оксид цинка, газовая сенсорика, MOF, каталитические реакции

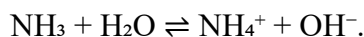
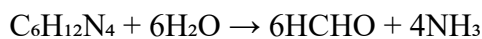
Введение

В условиях стремительного развития «Интернета вещей» и систем «умный дом» полупроводниковые газочувствительные системы приобретают критическую актуальность, обеспечивая недорогой и высокочувствительный контроль качества воздуха для безопасности жизни и здоровья людей [1, 2]. Низкая селективность газовых сенсоров, реагирующих на широкий спектр восстанавливающих и окисляющих газов, делает невозможным точный анализ многокомпонентных смесей. Время отклика и восстановления некоторых сенсоров достигает десятков минут, что исключает их применение в системах экологического мониторинга реального времени. Высокая рабочая температура (200–400°C) полупроводниковых сенсоров приводит к значительному энергопотреблению и создает потенциальную опасность при детектировании горючих газов. Пассивация поверхности продуктами химических реакций вызывает дрейф сигнала и требует частой калибровки, а миграция дефектов под действием температуры усугубляет нестабильность характеристик.

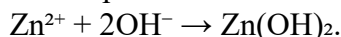
Одним из наиболее распространенных материалов для газовых сенсоров является оксид цинка [3,4]. Это широкозонный (3.3 эВ) полупроводник n-типа с высокой подвижностью электронов, что создает основу для управления переносом заряда на молекулярном уровне. Отсутствие центра симметрии в гексагональной структуре вюрцита обеспечивает проявление пиро- и пьезоэлектрических эффектов [5,6], определяя потенциал ZnO для сенсоров без внешнего нагрева. Оксид цинка химически стабилен, нетоксичен и совместим с микроэлектронной технологией, что делает его применимым для детектирования NO₂, NH₃, этанола, CO и ряда других газообразных веществ. Формирование ZnO в виде одномерных наностержней обеспечивает максимальное отношение площади поверхности к объему за счет доступности всех кристаллических граней для адсорбции. Также такая структура позволяет электронам двигаться вдоль оси наностержня без рассеяния на межзеренных границах. Естественная пористость наностержневого слоя создает кратчайшие диффузионные пути для молекул газа к активным центрам. Выбор кристаллографической ориентации при росте наностержней позволяет управлять доминирующим типом точечных дефектов. Целью работы было получение наностержней ZnO на подложке гидротермальным методом для использования в качестве газочувствительного слоя.

Предварительное нанесение на подложки водного раствора ацетата цинка с последующим отжигом при 500°C создает на поверхности центры кристаллизации, обеспечивающие

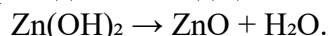
направленный рост наностержней. Гидротермальный синтез при 85°C в эквимольном растворе нитрата цинка и гексаметилентетрамина (НМТА) позволяет формировать газочувствительные слои с развитой поверхностью при низких температурах. При нагревании НМТА постепенно гидролизуются с образованием аммиака, который создаёт слабощелочную среду:



Ионы цинка взаимодействуют с гидроксид-ионами с образованием гидроксида цинка:



При нагревании $\text{Zn}(\text{OH})_2$ переходит в оксид цинка:



Выбранная методика позволяет получать наностержневые слои ZnO , пригодные для газовых сенсоров. Предварительная обработка подложек ацетатом цинка обеспечивает направленный рост наностержней, а развитая поверхность полученных слоёв способствует увеличению числа активных центров адсорбции.

Основные пути развития сенсорных слоев ZnO - это управление поверхностной структурой, составом и межфазными взаимодействиями. Для этого разрабатываются методы создания многокомпонентных оксидных наносистем [7,8]. Повышенный отклик многокомпонентных оксидных систем обусловлен присутствием на их поверхности адсорбционных центров различной природы. В газовых сенсорах изменение сопротивления определяется кинетикой каталитических реакций детектируемого газа на поверхности чувствительного слоя, которые подразделяются на кислотно-основные (протонный перенос, коррелирующий с электроотрицательностью по Льюису) и окислительно-восстановительные (электронный перенос). Для многокомпонентных систем ключевым фактором выступает снижение энергии разрыва связи «хемосорбированный кислород-катион металла». Преимуществом таких материалов является комбинация адсорбционных центров с различными кислотно-основными (из-за различий в электроотрицательности катионов) и окислительно-восстановительными свойствами (благодаря повышенной концентрации кислородных вакансий). Увеличение концентрации кислородных вакансий на поверхности ZnO повышает количество центров адсорбции газа и ускоряет окислительно-восстановительные реакции, что сокращает время отклика сенсора на молекулярном уровне.

Формирование MOF-оболочки (например, ZIF-8) [9,10] вокруг наностержня ZnO создаёт эффект молекулярного сита и обеспечивает избирательную адсорбцию целевых молекул. Актуальной задачей в этом направлении является оптимизация толщины MOF-оболочки. Слишком тонкий слой не обеспечивает селективность, а слишком толстый - замедляет диффузию газа к ядру ZnO .

Катионы металлов с разной электроотрицательностью и кислородные вакансии отвечают за реакционную способность и быстродействие, тогда как MOF-оболочка обеспечивает селективность, что делает эти подходы взаимодополняющими. Таким образом, многоуровневая архитектура «ядро ZnO – многокомпонентная оболочка - пористая MOF-оболочка» представляет собой перспективную платформу атомно-молекулярного дизайна для создания чувствительных, быстрых и селективных газовых сенсоров нового поколения.

Список литературы

1. Wang P., Xu, S., Shi X., Zhu J., Xiong H., Wen H. Recent Advances in Resistive Gas Sensors: Fundamentals, Material and Device Design, and Intelligent Applications // Chemosensors. 2025. V. 13. P. 224.

2. Hu C., Zhang W., Yang J., Pei Y., Tan X., Dong B., Song H., Xu L. Chemiresistive gas sensors for intelligent sensing: design strategies, emerging applications and future challenges // Chem. Soc. Rev. 2025. V. 54. P. 11302-11367.
3. Рябко А.А., Бобков А.А., Налимова С.С., Максимов А.И., Левицкий В.С., Мошников В.А., Теруков Е.И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 758-764.
4. Anikina M.A., Ryabko A.A., Nalimova S.S., Maximov A.I. Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1851. P. 012010.
5. Ali I., Yue X.A., Gaster B.R., Hussain M.D., Dudem B., Silva S.R.P., Parraman C. (2D Material Decorated ZnO for Screen Printable Wearable Textile-Based Piezoelectric Nanogenerator // Energy Environ. Mater. 2026. V. 9. P. e70138.
6. Liu Z., Dong X., Guo Y., Li S., Cao H. Effects of sputtering process and annealing on the microstructure, crystallization orientation and piezoelectric properties of ZnO films // Next Materials. 2025. V. 6. P. 100429.
7. Налимова С.С., Мошников В.А., Шомахов З.В., Кондратьев В.М. Газовые сенсоры на основе наноструктур двойных и тройных оксидных систем // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27. № 2. С. 105-118.
8. Карпова С.С., Мошников В.А., Мякин С.В., Коловангина Е.С. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 3. С. 369-372.
9. Mourdikoudis S., Dutta S., Kamal S., Gómez-Graña S., Pastoriza-Santos I., Wuttke S., Polavarapu L. State-of-the-Art, Insights, and Perspectives for MOFs-Nanocomposites and MOF-Derived (Nano)Materials // Adv. Mater. 2025. V. 37. Is. 52. P. 2415399.
10. Zhang C., Wu Y., Li D., Jiang H.-L. Recent advances in MOF composites for photocatalysis // Chem. Sci. 2025. V. 16. P. 13149-13172.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМА В ВИДЕ СЛУЧАЙНОГО ТЕЛЕГРАФНОГО СИГНАЛА В СУБМИКРОННЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

КРАСНОКУТСКИЙ Д. С.

АО «НИИМЭ»

Аннотация. В данной работе представлено моделирование шума субмикронного МДП-транзистора в виде случайного телеграфного сигнала с использованием алгоритма Гиллепси, основанного на представлении процесса захвата/эмиссии носителей заряда на ловушечных центрах в виде непрерывной цепи Маркова. В рамках разработанной модели учитывается многоловушечный характер шума, при котором состояние системы определяется конфигурацией занятости ловушек. Для расчета времен захвата и эмиссии используется физическая модель, включающая в себя влияние квантования инверсионного слоя. Показано, что данная модель может быть использована для анализа влияния изменения электронного состояния ловушки на характеристики низкочастотного шума.

Ключевые слова: низкочастотный шум, случайный телеграфный сигнал, субмикронный МДП-транзистор

Введение

Для субмикронных МДП-транзисторов с площадью затвора менее, чем 1 мкм², низкочастотный электрический шум является серьезным ограничивающим фактором с точки зрения производительности, так и стабильности работы интегральных схем [1]. Одним из ключевых компонент низкочастотного шума является генерационно-рекомбинационный шум. Физическая природа генерационно-рекомбинационного шума в МДП-структурах связана с процессами захвата и эмиссии носителей заряда на ловушках, расположенных в слое подзатворного диэлектрика или на его интерфейсе с кремнием. Ловушки обмениваются носителями заряда с инверсионным каналом, вызывая локальные флуктуации числа носителей заряда, что приводит к колебаниям тока стока. При этом наибольшее влияние

на итоговый уровень шума транзистора оказывают дефекты у границы раздела Si/SiO₂ (E'-центры) [2].

Уменьшение активной области транзистора приводит к росту относительного влияния единичных дефектов на электрические характеристики транзистора. В случае значительного вклада одиночного ловушечного центра шум становится различимым во временной области и наблюдается в виде случайного телеграфного сигнала (СТС). Таким образом, в низкочастотной области для МДП-транзисторов с длиной канала менее 45 нм доминирующей составляющей шума становится СТС, который устанавливает предел для минимального обнаруживаемого сигнала и чувствительности устройства. В дополнении к этому исследование СТС может быть использовано для получения информации об электронном состоянии и пространственном положении ловушечного центра.

Анализ механизмов возникновения СТС представляет собой перспективную задачу, обусловленную возрастающим влиянием единичных ловушечных центров на характеристики субмикронных МДП-транзисторов. Для исследования физических механизмов возникновения СТС необходимы модели, позволяющие связать микроскопические процессы захвата и эмиссии носителей с наблюдаемым шумовыми характеристиками [3]. Целью данной работы является разработка стохастической модели СТС на основе процесса Маркова для анализа влияния параметров ловушек на временные и спектральные характеристики шума.

Физическая модель расчета времени захвата и эмиссии

Известно, что переходы носителей заряда между ловушками в оксиде и каналом определяются статистикой Шокли-Рида-Холла. Когда электрическое поле в инверсном слое МДП-транзистора достаточно большое, то тогда образуется треугольная потенциальная яма на границе раздела Si/SiO₂, что приводит к квантованию зоны проводимости на дискретные энергетические уровни [4]. В этом случае инверсный канал описывается как двумерный электронный газ. Эффекты квантования могут привести к изменению энергий захвата и эмиссии носителей заряда, и с их учетом среднее время захвата и эмиссии может быть определено как:

$$\tau_c = \frac{1}{\sigma(2D)v_{th}n_{2D} \int_0^{x_T} \frac{p(x)}{x_T} dx}$$

где $\sigma(2D)$ – 2D сечение захвата, v_{th} – тепловая скорость носителей, n_{2D} – 2D концентрация электронов, x_T – положение ловушки в диэлектрике, $p(x)$ – плотность вероятности нахождения носителя на расстоянии x от интерфейса;

$$\tau_e = \frac{\exp[(E_F - E_t)/kT]}{\sigma(2D)v_{th}n_{2D} \int_0^{x_T} \frac{p(x)}{x_T} dx}$$

E_F – уровень Ферми, E_t – энергетический уровень ловушки.

$p(x)$ может быть найдено с использованием волновой функции Штерна-Говарда.

Если источником шума являются как флуктуации числа носителей заряда, так и флуктуации подвижности, тогда колебания напряжения на стоке могут быть выражены как:

$$\frac{\Delta V_{DS}}{V_{DS}} = -\left(\frac{1}{N} \pm \alpha\mu\right) \frac{1}{WL_{eff}}$$

где N – концентрация электронов в инверсном слое, μ – эффективная подвижность носителей заряда в канале, α – коэффициент рассеяния, W и L_{eff} – ширина устройства и эффективная длина соответственно.

Модель Маркова для моделирования состояния ловушки

Процессы захвата и эмиссии носителей заряда ловушечными центрами носят стохастический характер и могут быть описаны в рамках непрерывной цепи Маркова [5]. В таком случае ловушка может иметь незаполненное (0) и заполненное (1) состояния. Предполагается, что пребывание ловушки в каждом из состояний описывается экспоненциальным распределением. Интенсивности переходов между состояниями могут быть заданы как: $\lambda_c = 1/\tau_c$ и $\lambda_e = 1/\tau_e$. Для одной ловушки процесс описывается непрерывной цепью Маркова с матрицей переходов Q :

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda_c & \lambda_c \\ \lambda_e & -\lambda_e \end{pmatrix}$$

Вероятности нахождения ловушки в заполненном и незаполненном состояниях равны:

$$P_1 = \frac{\tau_e}{\tau_e + \tau_c}; P_2 = \frac{\tau_c}{\tau_e + \tau_c}$$

В случае наличия нескольких ловушек состояния системы определяется вектором занятости ловушек, и общее число состояний равно 2^K , где K — общее число ловушек. Интенсивности переходов при этом зависят от вклада времен захвата и эмиссии каждой ловушки.

Для реализации процесса Маркова во времени может быть применен алгоритм Гиллепси. Принцип построения вычисления следующий: на каждом шаге вычисляется суммарная интенсивность выходящих переходов из текущего состояния: $\Lambda = \sum_i \lambda_i$, после чего генерируется случайное время до следующего события: $\Delta t = -\ln r / \Lambda$, где $r \in (0, 1)$. Тип перехода определяется вероятностью, пропорциональной соответствующей интенсивности. После этого система переходит в новое состояние, и процесс повторяется. Затем полученная непрерывная во времени траектория состояния ловушки дискредитируется с определенной частотой, что позволяет корректно учесть статистику переключения ловушки.

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования шумовых характеристик МДП-транзистора с оксидными ловушечными уровнями, порождаемыми дефектами типа V^0 ODC II и располагающимися на глубине 0.5-0.7 нм от границы раздела Si/SiO₂. На рис. 1 представлены результаты моделирования СТС шума во временной области для транзистора с длиной канала 35 нм, шириной затвора 1 мкм. Моделируется работа транзистора в режиме насыщения.

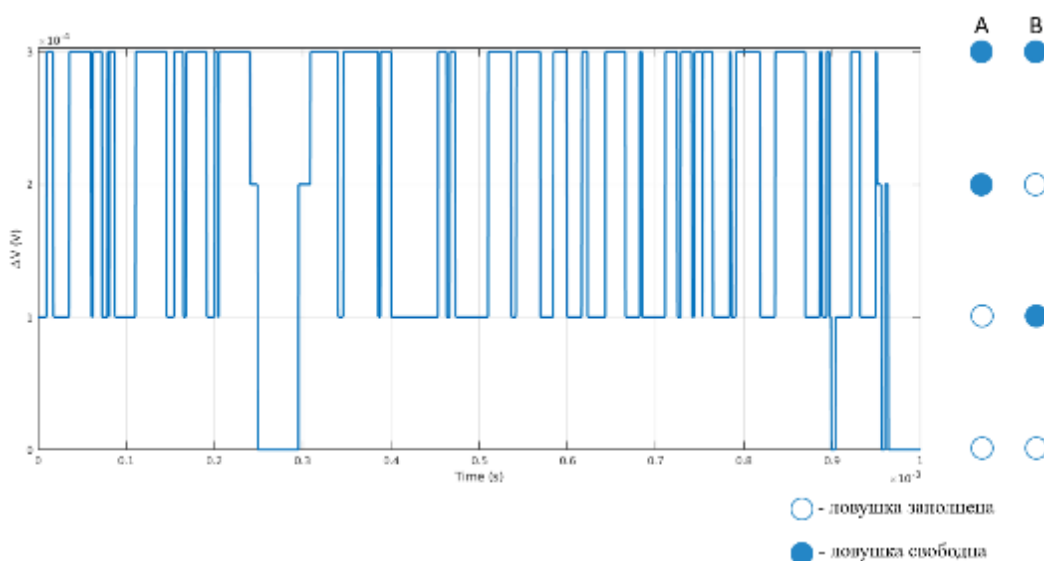


Рис. 1. Моделирование СТС шума во временной области для МДП-транзистора с длиной канала 35 нм. Энергии ловушек приняты 0.23 эВ (А) и 0.28 эВ (В) (отсчет от дна зоны проводимости).

На рис. 2 представлены результаты моделирования спектральной плотности мощности шума от частоты для транзисторов с длинами канала 35 и 350 нм.

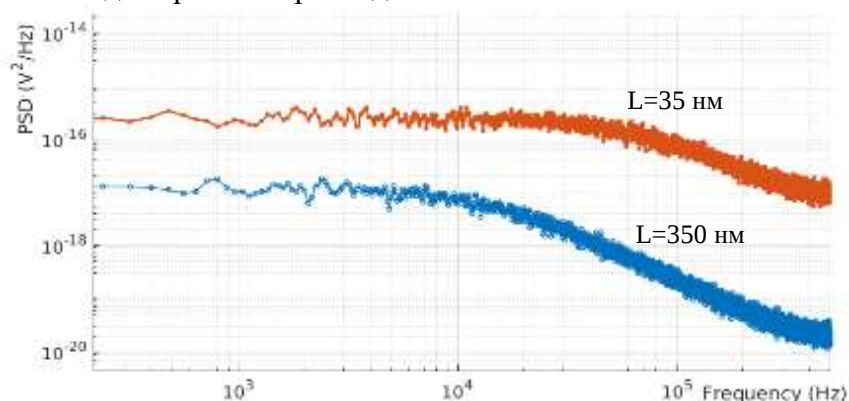


Рис. 2. Спектральная плотность мощности шума для транзисторов с различными длинами канала

Заключение

Предложенный в работе метод моделирования СТС шума с учетом эффектов 2D-квантования инверсионного слоя может быть применен для оценки шумовых характеристик субмикронного транзистора с учетом особенностей оксидных ловушечных центров. Разработанная модель учитывает, как флуктуацию числа носителей заряда, так и подвижности, что обеспечивает более полное описание механизмов формирования СТС шума. Показано, что модель корректно отражает влияние геометрических параметров канала на амплитуду и спектральные характеристики шума. Такой подход в виде стохастического моделирования может быть использован для анализа экспериментальных данных и извлечения информации о ловушечных центрах в подзатворном диэлектрике.

Список литературы

1. Marinov O., Deen M. J., Jiménez-Tejada J. A. Low-frequency noise in downscaled silicon transistors: Trends, theory and practice // Physics Reports. – 2022. – Т. 990. – С. 1-179.

2. Martin-Martinez J., Rodriguez R., Nafria M. Advanced characterization and analysis of random telegraph noise in CMOS devices // Noise in Nanoscale Semiconductor Devices. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – С. 467-493.
3. Shamsur Rouf A. S. M., Çelik-Butler Z. Oxide trap-induced RTS in MOSFETs // Noise in Nanoscale Semiconductor Devices. – Cham : Springer International Publishing, 2020. P. 553-607.
4. Çelik-Butler Z., Wang F. Effects of quantization on random telegraph signals observed in deep-submicron MOSFETs // Microelectronics Reliability. – 2000. – Т. 40. – №. 11. – С. 1823-1831.
5. Marquez, C., Huerta, O., Tec-Chim, A. I., Guarin, F., Gutierrez-D, E. A., Gamiz, F. Systematic characterization of random telegraph noise and its dependence with magnetic fields in MOSFET devices // Noise in Nanoscale Semiconductor Devices. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – С. 135-174.

HDL-КОНТРОЛЛЕР УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ MEMS-СЕНСОРОВ

КУВАРЗИН В., ПОЛЯКОВ Д. А.

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

Аннотация. В работе рассматривается разработка цифрового контроллера движения роботизированной платформы на языке VHDL. Контроллер реализован в виде конечного автомата и обеспечивает формирование сигналов разрешения, направления, скорости движения и ШИМ-управления электродвигателем. Для согласования цифровой части с исполнительной нагрузкой используется драйвер L298N, управление которым осуществляется с применением широтно-импульсной модуляции. Проведено моделирование цифровых модулей и измерения формы сигнала двигателя. Разработанная система может использоваться как основа для платформы интеграции и исследования MEMS-сенсоров.

Ключевые слова: MEMS-сенсор, ПЛИС, VHDL, HDL-контроллер, роботизированная платформа, электродвигатель, ШИМ, L298N.

Введение

MEMS-сенсоры широко применяются в системах позиционирования и управления движением. Для их практической интеграции требуется управляемая электромеханическая платформа, обеспечивающая формирование повторяемых режимов движения. В связи с этим актуальной является разработка цифрового HDL-контроллера на базе ПЛИС. Такой контроллер позволяет задавать режимы перемещения роботизированной платформы и может быть использован как основа для последующей интеграции MEMS-сенсоров.

Целью работы является разработка HDL-контроллера управляемой роботизированной платформы для управления электродвигателем, исследования условий повышения плавности управления и последующей интеграции MEMS-сенсоров.

Структура разрабатываемой системы

Разрабатываемая система представляет собой управляемую роботизированную платформу, включающую сенсорный, цифровой и исполнительный уровни. Обобщённая структурная схема системы управления представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы управления роботизированной платформой.

Сенсорный уровень предназначен для получения параметров движения с помощью MEMS-модуля MPU-6050, содержащего акселерометр и гироскоп. Данные передаются по интерфейсу I²C. Цифровой уровень (уровень управления) реализуется на ПЛИС и включает контроллер состояний, модуль ШИМ и другие дополнительные блоки. Исполнительный уровень построен на драйвере L298N, который преобразует сигналы направления и ШИМ в управляющее воздействие на электродвигатели.

Разработка HDL-контроллера движения

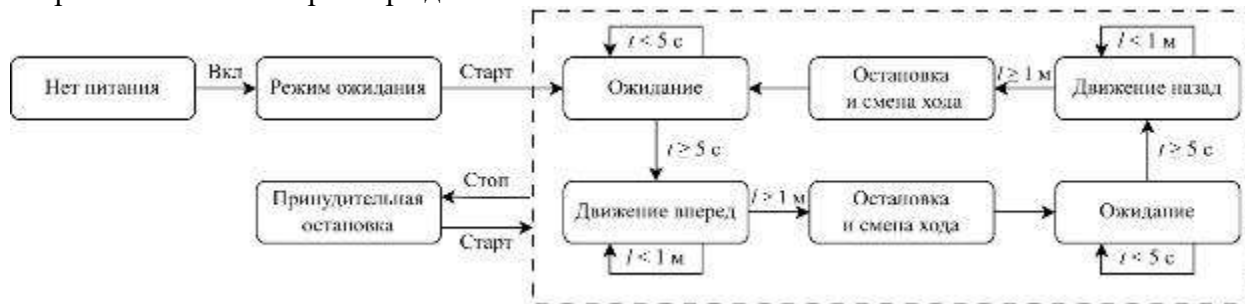


Рис. 2. Диаграмма состояний HDL-контроллера движения.

Основным цифровым модулем системы является контроллер состояний, реализованный на языке VHDL. Автомат формирует сигналы разрешения движения и направления, обеспечивая последовательность режимов: ожидание, задержка перед стартом, движение вперед, остановка со сменой направления, движение назад и возврат в режим ожидания. При поступлении сигнала стоп система принудительно переводится в состояние ожидания. Диаграмма состояний представлена на рис. 2.

Формирование управляющих сигналов электродвигателя

ПЛИС формирует логические сигналы для силового драйвера. В разрабатываемой системе для управления двигателем используется драйвер L298N, выполняющий функцию усилительного звена между цифровой частью и исполнительным устройством.

На вход драйвера подаются сигнал направления и ШИМ-сигнал, определяющий среднюю мощность, подводимую к двигателю. Дополнительно разработан трёхразрядный модуль задания управляющего кода, обеспечивающий ступенчатое изменение коэффициента заполнения. Структура формирования сигналов представлена на рис. 3.



Рис. 3. Формирование управляющих сигналов двигателя.

Моделирование и экспериментальная проверка

Проверка разработанных HDL-модулей выполнялась с использованием моделирования VHDL-описаний. В ходе моделирования контролировались переходы между состояниями конечного автомата, формирование сигналов движения, остановки и направления, а также работа модуля ШИМ. Результаты моделирования показали, что цифровые модули формируют требуемую последовательность управляющих сигналов в соответствии с заданным алгоритмом движения.

Экспериментальная проверка проводилась при управлении электродвигателем через драйвер L298N с использованием ШИМ-сигнала частотой 1 кГц. Осциллограмма напряжения на выводах двигателя при ШИМ-управлении представлена на рис. 4.

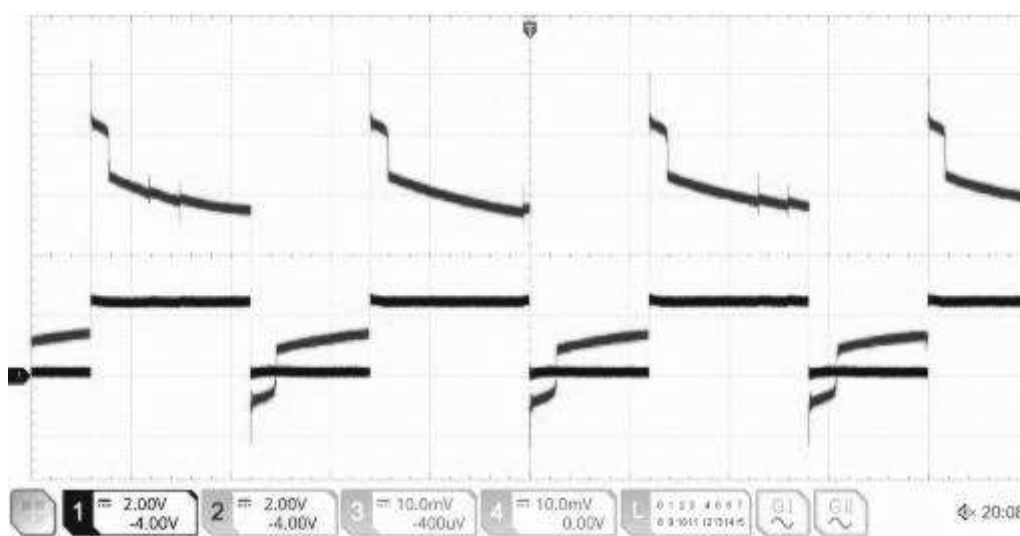


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на двигателе при ШИМ-управлении.

На осциллограмме видно, что форма напряжения отличается от идеального прямоугольного сигнала. На фронтах ШИМ наблюдаются выбросы напряжения и переходные процессы. Это связано с индуктивностью обмотки двигателя, наличием параллельно подключённого конденсатора, работой защитных диодов драйвера и возникновением противо-ЭДС при вращении ротора.

Для дополнительного анализа была разработана упрощённая модель выходной цепи драйвера L298N с двигателем постоянного тока. В модели драйвер представлен импульсным источником напряжения, двигатель последовательной RL-цепью с источником противо-ЭДС. Также учтены защитные диоды и параллельно подключённый конденсатор. Упрощённая модель выходной цепи представлена на рис. 5.

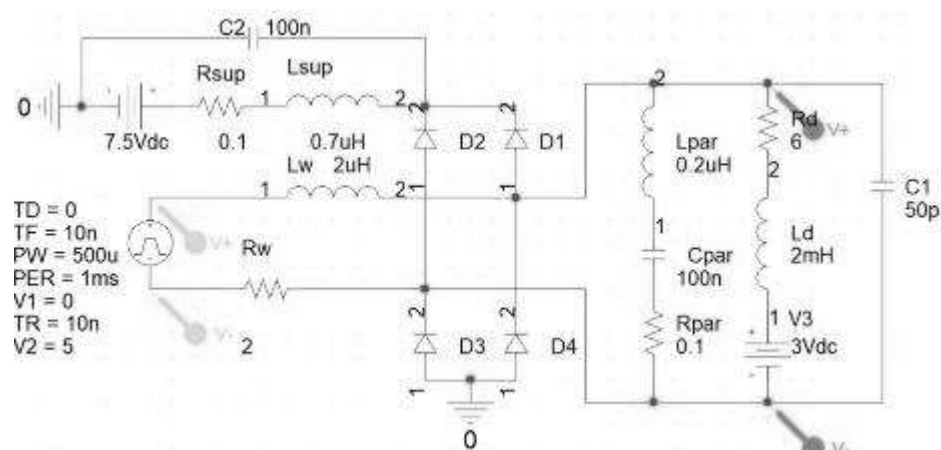


Рис. 5. Упрощённая модель выходной цепи драйвера L298N с двигателем постоянного тока.

Результаты моделирования в Pspice, представленные на рис. 6, качественно соответствуют экспериментальной осциллограмме: наблюдаются выбросы напряжения, плавные участки спада и провал при выключении импульса. Отличие амплитуд объясняется упрощением модели и отсутствием учёта всех паразитных параметров платы, проводников, измерительного щупа и электрохимической части двигателя.

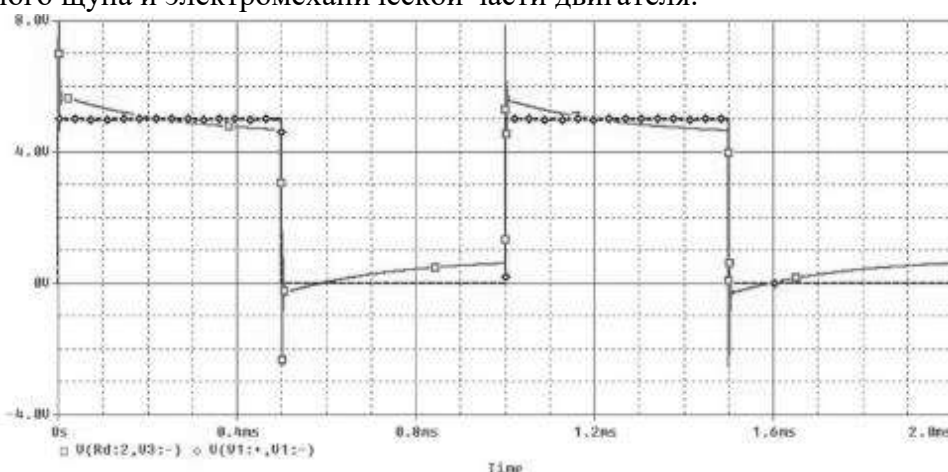


Рис. 6. Результаты моделирования упрощенной модели в PSpice.

В ходе экспериментальной проверки также было установлено, что при малых значениях коэффициента заполнения ШИМ-сигнала двигатель не переходит в режим устойчивого вращения, однако в его обмотках протекает импульсный ток, вызывающий акустический шум. Это связано с тем, что среднее напряжение на двигателе оказывается недостаточным для преодоления момента трения покоя и запуска вращения.

Полученные результаты показывают, что для повышения плавности управления целесообразно увеличить разрядность управляющего кода по сравнению с трёхразрядным вариантом, а также учитывать минимальный уровень питающего напряжения и коэффициента заполнения ШИМ, при котором начинается устойчивое вращение двигателя.

Заключение

В результате работы разработан HDL-контроллер движения роботизированной платформы на языке VHDL. Контроллер формирует сигналы движения, направления и ШИМ-управления электродвигателем. Моделирование подтвердило корректность работы цифровых модулей, а экспериментальная проверка через драйвер L298N выявила переходные

процессы, выбросы напряжения и влияние низкого среднего напряжения на запуск двигателя. Показано, что для повышения плавности управления целесообразно увеличить разрядность управляющего кода, а также учитывать минимальное значение коэффициента заполнения ШИМ и среднего напряжения, при котором начинается устойчивое вращение двигателя. Разработанная архитектура может использоваться как основа для последующей интеграции MEMS-сенсоров.

Список литературы

1. NXP Semiconductors. UM10204: I2C-bus specification and user manual. Rev. 7.1. 2021. P. 64.
2. STMicroelectronics. L298: Dual full-bridge driver. Datasheet. 2023. P. 23.
3. InvenSense Inc. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Document Number: PS-MPU-6000A-00. Rev. 3.4. 2013. 52 p.
4. Xilinx. XST User Guide for Virtex-4, Virtex-5, Spartan-3, and Newer CPLD Devices. UG627. Version 14.7. 2013. P. 568.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ МАКРОДЕФЕКТОВ В ПОДЛОЖКАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Горляк А.Н.¹, Кузьмин Е.А., Трушлякова В.В., Усикова М.А.

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

Аннотация. Предложен комплекс оптических методов, основанных на люминесцентной, поляризационной, дифференциальной интерференционно-контрастной (DIC) микроскопии, а также на оригинальных приемах диэмиссионного селективного контраста и мультиэмиссионного рассеянного освещения. В сочетании с фотограмметрической обработкой снимков и использованием столика Федорова это позволяет без искажений изучать объемную морфологию макродефектов в полированных подложках 4Н-SiC. Показана эффективность подхода для визуализации гексагональных пустот, политипных неоднородностей и углеродных включений, а также для реконструкции их пространственного взаимодействия.

Ключевые слова: карбид кремния, макродефекты, дислокации, оптическая микроскопия, люминесценция, поляризационная микроскопия, дифференциальный интерференционный контраст, столик Федорова, фотограмметрия

Введение

Монокристаллический карбид кремния политипа 4Н является ключевым материалом силовой и высокотемпературной электроники. Выход годных приборов критически зависит от плотности и пространственного распределения структурных дефектов в подложке, в первую очередь, микро- и макропор, щелей, пустот, политипных и углеродных включений. Неразрушающая оптическая микроскопия благодаря разнообразию схем контрастирования на сегодняшний день является наиболее востребованным инструментом контроля структурного несовершенства монокристаллов. Однако плоскопараллельная форма подложек и большой показатель преломления SiC создают серьезные трудности для исследования объемной конфигурации дефектов. В настоящей работе представлены результаты применения люминесцентной и поляризационной микроскопии, дополненные техникой наклона образца с минимизацией искажений, для детального анализа морфологии и взаимного расположения макродефектов.

Методика проведения эксперимента

В качестве образцов авторами были выбраны 2-х дюймовые полированные пластины 4H-SiC, полученные в различных технологических условиях модифицированным методом Лели. Исследования проводились с использованием люминесцентного микроскопа «Люам-Р1», поляризационного микроскопа «МИН-8» и поляризационно-интерференционного микроскопа «BIOLAR PI» с использованием светлого и темного поля, дифференциально-интерференционного контраста, а также двух разработанных авторами режимов обеспечения контраста: «метода диэмиссионного селективного контраста» и «метода мультиэмиссионного рассеянного освещения».

Первый из двух отмеченных методов (рис. 1) наиболее эффективен вблизи границы политипов и реализуется одновременной засветкой образца белым светом (темнопольное освещение), а также возбуждающим излучением люминесцентного осветителя, снабженного дихроичным и эмиссионным фильтрами расширенного спектрального диапазона. Такой прием позволяет в одном кадре регистрировать структурную информацию как о поглощающих элементах, так и о политипном составе по цвету видимой люминесценции, что особенно эффективно для выявления границ политипов, макропор, щелей и включений иной кристаллической модификации.

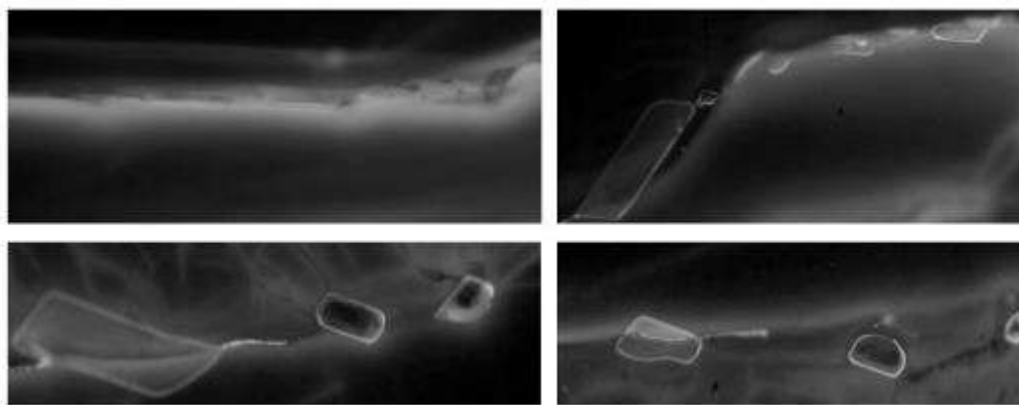


Рис. 1. Метод диэмиссионного селективного контраста. Изображения получены с использованием люминесцентного микроскопа «Люам-Р1» с дихроичным и эмиссионным фильтрами расширенного рабочего спектрального диапазона при УФ возбуждении ($\lambda \sim 360$ нм)

Метод «мультиэмиссионного рассеянного освещения» (рис. 2) заключается в декорировании дефектной структуры посредством подсветки участка образца лучами смешанного спектрального состава от нескольких эмиссионных источников, локализующихся как внутри самого образца от макро- и микрообразований, так и от рассеивающей необработанной его поверхности, с переключением длины волны возбуждения люминесценции. Излучение каждого источника, пройдя дефектную область, формирует спектрально-кодированное изображение, подчеркивающее одновременно топографические особенности и локальные вариации различных свойств объемных ростовых преобразований. Вращением образца относительно регистрирующей оптической системы авторы формировали серию снимков под разными ракурсами, что служило основой для последующей фотограмметрической 3D-реконструкции.

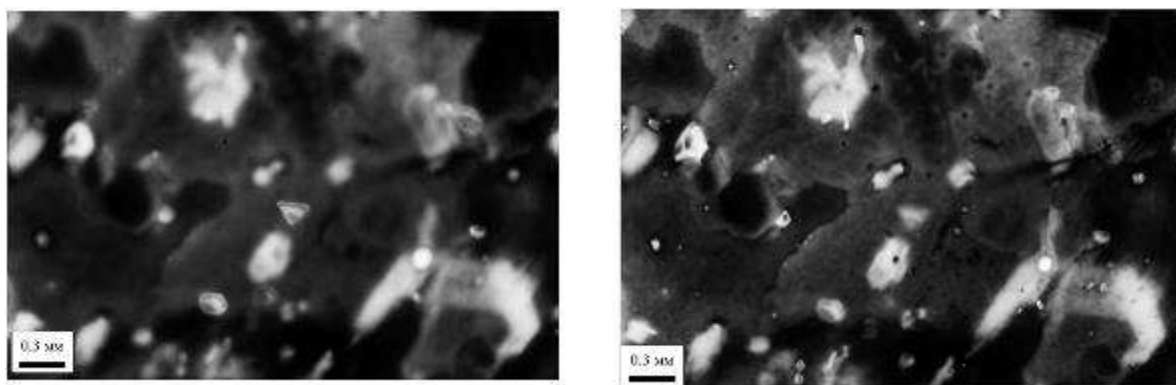


Рис. 2. Изображения области образца пластины SiC, иллюстрирующие реализацию метода мультиэмиссионного рассеянного освещения. Фокусировка на разной глубине

Использование метода фотограмметрии для исследования пластин карбида кремния ограничивается большим показателем преломления материала, вызывающим сильные искажения, для частичного устранения которых авторы работы помещали образец между двумя прозрачными полусферами универсального столика Федорова (рис. 3а). Благодаря близости показателей преломления полусфер и кристаллической подложки, границы раздела существенно меньше преломляют лучи, и при наклоне столика исключается анаморфотная деформация изображений [1]. В результате удастся регистрировать геометрически корректные конфигурации дефектных структур под различными углами, что радикально повышает достоверность объемной реконструкции.

Результаты и обсуждение

Гексагональные пустоты, типичные для 4Н-SiC, авторами фиксировались как макродефекты с поперечным сечением до сотен микрометров. Применение диэмиссионного селективного контраста (рис. 1) и дифференциального интерференционного контраста выявило их огранку и часто присутствующий внутри спиралевидный рельеф. Поляризационно-интерференционные наблюдения показали равномерную окраску в окрестности пустот, свидетельствующую об отсутствии значительных остаточных напряжений, что согласуется с известными данными [2]. Мультиэмиссионное рассеянное освещение (рис. 2) дало возможность одновременно визуализировать пустоты, прилегающие ростовые ступени и мелкие инородные частицы, собственное излучение которых заметно контрастировало с люминесценцией окружающей области.

Границы политипов 4Н/6Н, а также включения 15R и 3С однозначно идентифицировались по цветовому люминесцентному контрасту при диэмиссионной подсветке, а также по появлению характерных «щелей» и скоплений микро- и макропор. Использование мультиэмиссионного режима позволило без смены оптической схемы наблюдать и саму границу, и развитую дефектную структуру с преобладанием макропор, щелей, пустот (рис. 3б).

Углеродные включения авторами наблюдались как компактные черные скопления, хорошо заметные при косом освещении. Их концентрация возрастала к периферии пластины, что объясняется потерей кремния ростовой ячейкой и обогащением газовой фазы углеродом [3]. Совместное применение оптической микроскопии и селективного травления в КОН показало, что вокруг углеродных частиц генерируются базисные и винтовые дислокации, а также микропоры.

Наклон столика Федорова с накладными стеклянными полусферами дал возможность впервые практически без искажений рассмотреть боковые стенки гексагональных пустот.

При отклонении на $\pm 30^\circ$ обнаружилось, что внутренние ступени доходят до дна полости, а сами пустоты часто пересекаются с цепочками микропор, вытянутых вдоль оси роста. Анализ фотограмметрических моделей, построенных по снимкам, полученным под разными углами, подтвердил, что политипные границы выступают зонами преимущественной концентрации дислокационных систем.

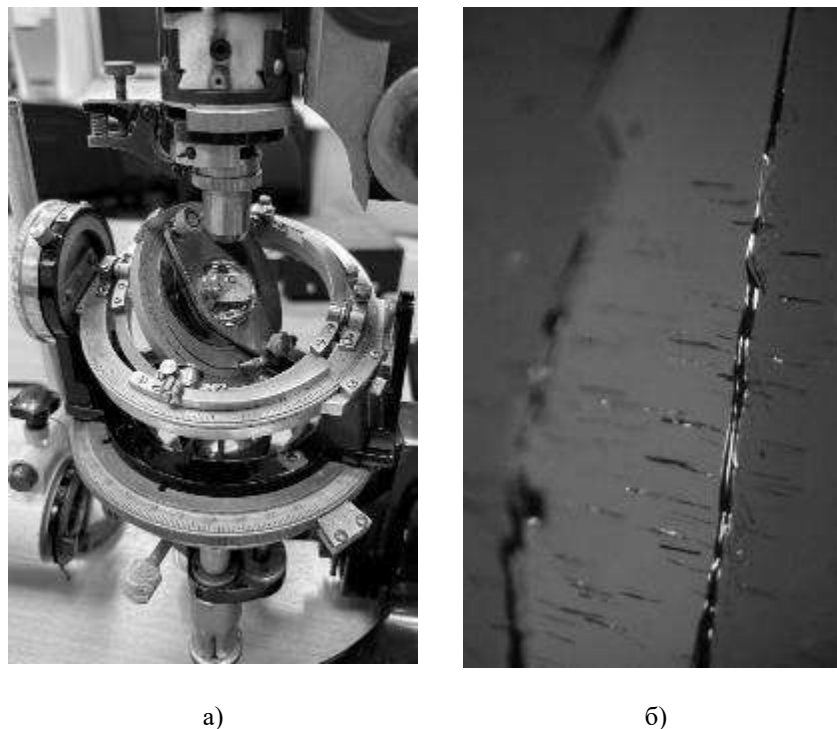


Рис. 3. Столик Федорова с образцом SiC подложки, размещенным между двумя стеклянными полусферами, установленный на вращающемся предметном столике поляризационного микроскопа (а); развитая дефектная структура в районе границы политипов 4H/6H (б)

Заключение

Предложенный подход, сочетающий люминесцентную, поляризационную и DIC-микроскопию с методами диэмиссионного селективного контраста и мультиэмиссионного рассеянного освещения, в сочетании с фотограмметрией и использованием столика Федорова, представляет собой мощный неразрушающий инструмент для исследования объемной структуры макродефектов в подложках SiC. Он открывает возможность детально анализировать пространственное расположение пустот, политипных неоднородностей и углеродных включений, а также реконструировать их эволюцию в ростовом процессе.

Список литературы

1. Соболев В.С. Федоровский метод. – 2-е изд., М.: Недра, 1964, 288 с.
2. Presser V., Loges A., Nickel K.G. Variability and character of hollow macro-defects in silicon carbide wafers // Phil. Mag., 2010, V. 88, p. 1639–1657.
3. Avrov D.D., Dorozhkin S.I., Tairov Yu.M. et al. Inclusions of carbon in ingots of silicon carbide grown by the modified Lely method // Semiconductors, 2008, V. 42, p. 1469–1474.

РАЗРАБОТКА НОСИМОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО МОНИТОРИНГА САТУРАЦИИ КРОВИ И ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

КУШНАРЕВА О.А., ШАПОВАЛОВ С.В.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Аннотация. В работе представлена разработка носимого устройства – браслета – для неинвазивного мониторинга насыщения крови кислородом (SpO_2) и частоты сердечных сокращений на основе рефлективной пульсоксиметрии. В качестве чувствительного элемента использован оптический модуль MAX30102. Для подавления помех и выделения пульсового сигнала разработан активный полосовой фильтр на операционных усилителях с полосой 0,1–49 Гц. Управление и пользовательский интерфейс реализованы на модуле ESP32-S3-LCD-1.69 с IPS-дисплеем 240×280. Спроектированы печатная плата аналогового модуля с разъёмом USB Type-C и вибромотором, а также корпус, изготовленный 3D-печатью. Проведена верификация работы тракта сбора данных.

Ключевые слова: пульсоксиметрия, сатурация крови, SpO_2 , фотоплетизмография, рефлективный метод, MAX30102, ESP32-S3, носимое устройство, аналоговый фильтр.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый тренд к персонализации медицинской диагностики и интеграции измерительных функций в носимые электронные устройства. Одним из наиболее востребованных параметров неинвазивного контроля является насыщение крови кислородом (SpO_2), определяющее эффективность дыхания и оксигенации тканей. Целью данной работы является создание компактного носимого устройства – браслета или часов – способного измерять SpO_2 и частоту сердечных сокращений в рефлективном режиме. В рамках проекта решались задачи теоретического обоснования выбранного метода, подбора и модификации датчика, разработки аналогового тракта и печатной платы, проектирования корпуса и создания базового программного обеспечения.

Теоретические основы пульсоксиметрии и выбор метода измерений

Принцип пульсоксиметрии базируется на фотоплетизмографии и различии спектров поглощения оксигенированного (HbO_2) и дезоксигенированного (Hb) гемоглобина. На рисунке 1 представлены коэффициенты экстинкции для красного (660 нм) и инфракрасного (880 нм) диапазонов, где наблюдается максимальная разница в поглощении. При прохождении света через пульсирующие ткани выделяют постоянную составляющую (DC), обусловленную статическим поглощением кожи и венозной кровью, и переменную (AC), связанную с артериальным притоком. Сатурация SpO_2 вычисляется по известной формуле (1) через отношение (AC/DC) на двух длинах волн:

$$SpO_2 = \frac{\varepsilon_{d1} - R\varepsilon_{d2}}{R(\varepsilon_{o2} - \varepsilon_{d2}) + (\varepsilon_{d1} - \varepsilon_{o1})}, \quad (1)$$

где ε_o и ε_d — коэффициенты экстинкции для HbO_2 и Hb соответственно (коэффициенты экстинкции для разных длин волн определены инвазивно на здоровых пациентах (рис. 1) и известны), индексы 1 и 2 относятся к двум длинам волн, а коэффициент R определяется как:

$$R = \frac{(AC/DC)_1}{(AC/DC)_2}. \quad (2)$$

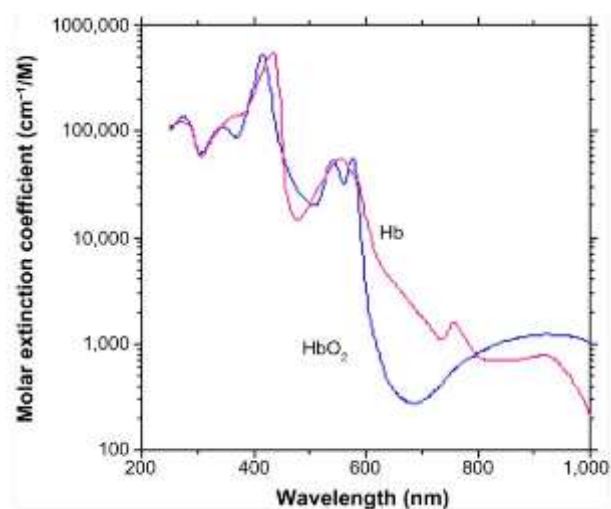


Рисунок 1 – Спектры поглощения молекул оксигенированного и дезоксигенированного гемоглобина [1]

Существуют два основных способа оптического измерения: трансмиссионный (излучение проходит насквозь) и рефлективный (излучение отражается). Трансмиссионный метод, используемый в классических клипсах на палец, обеспечивает более высокую точность за счёт однократного рассеяния, однако требует тонких участков тела и жёсткой фиксации, что затрудняет его применение в носимых устройствах. Рефлективный метод, напротив, позволяет размещать датчик практически на любой поверхности тела (запястье, грудь), демонстрирует меньшее энергопотребление и лучше совместим с форматом браслета, хотя его точность несколько ниже. На рисунке 2 показана схема трансмиссионной пульсоксиметрии. В настоящей работе были собраны макеты с использованием обоих подходов, итоговый макет данного этапа был выполнен на основе трансмиссионного напалечного датчика.

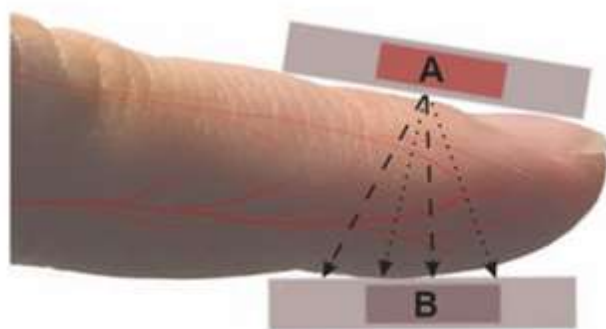


Рисунок 2 – Схема трансмиссионной пульсоксиметрии: A – источник света, B – детектор

Аппаратная реализация и модификация аналогового тракта

В первой итерации в качестве чувствительного элемента была рассмотрена микросхема MAX30102, представляющая собой интегрированный оптический модуль с двумя светодиодами (660 и 880 нм), высокочувствительным фотодиодом и 18-битным АЦП. Управление датчиком осуществляется по интерфейсу I²C, поддерживает настройку тока светодиодов до 50 мА и частоты дискретизации до 3200 выборок в секунду. На рисунке 3 приведён внешний вид платы датчика. На рисунке 4 представлены полученные сигналы по красному и инфракрасному светодиодам.

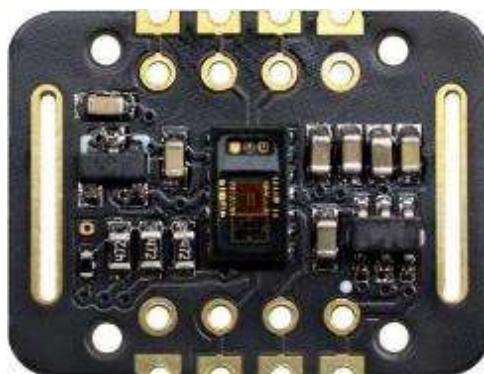


Рисунок 3 – Внешний вид платы с датчиком MAX30102

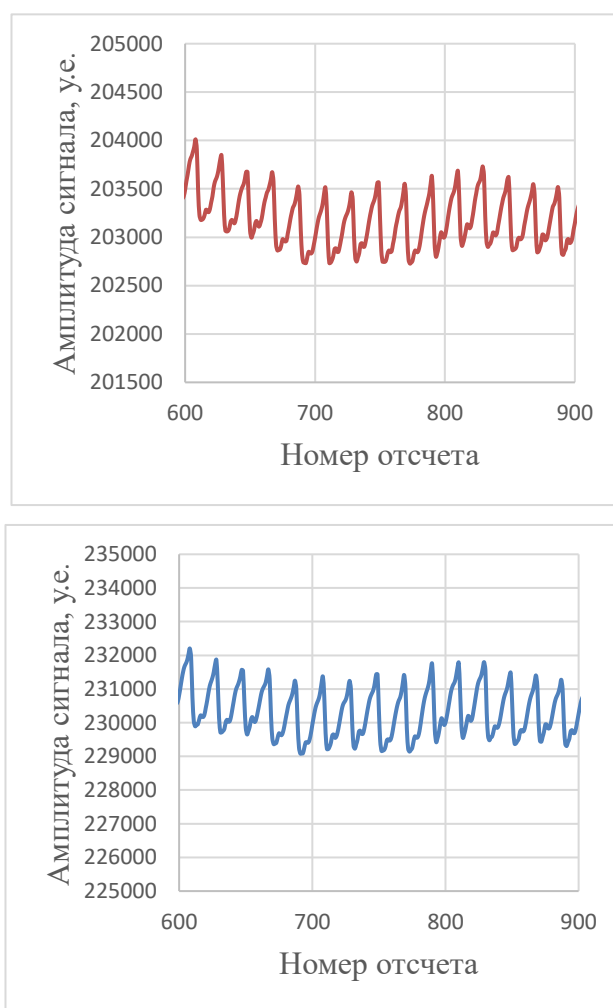


Рисунок 4 – Сигналы по каналам красного и инфракрасного светодиодов

Первичные эксперименты с MAX30102 выявили его значительную чувствительность к внешней засветке и артефактам движения. При воздействии внешнего освещения амплитуда полезного сигнала падала в 4–5 раз, а малые движения пальца приводили к искажению плетизмограммы. Кроме того, в первой версии макета при попеременном включении светодиодов постоянная составляющая сигнала оказывалась настолько велика, что полезный пульсовый сигнал терялся.

Для устранения этих проблем было решено использовать трансмиссионный напалечный датчик сатурации, представленный на рисунке 5, а также был дополнительно разработан полосовой активный фильтр на четырёх операционных усилителях с полосой пропускания 0,1–49 Гц, который подавляет высокочастотную помеху от переключения светодиодов и выделяет именно диапазон частот сердечных сокращений. На рисунке 6 представлены схема фильтра и его амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики. Дополнительно в схему введён повторитель опорного напряжения для экранирования паразитных токов.

По результатам данного блока была получена осциллограмма, представленная на рисунке 7, которая в достаточной степени удовлетворяет конечной цели исследования.



Рисунок 5 – Напалечный трансмиссионный датчик SpO₂

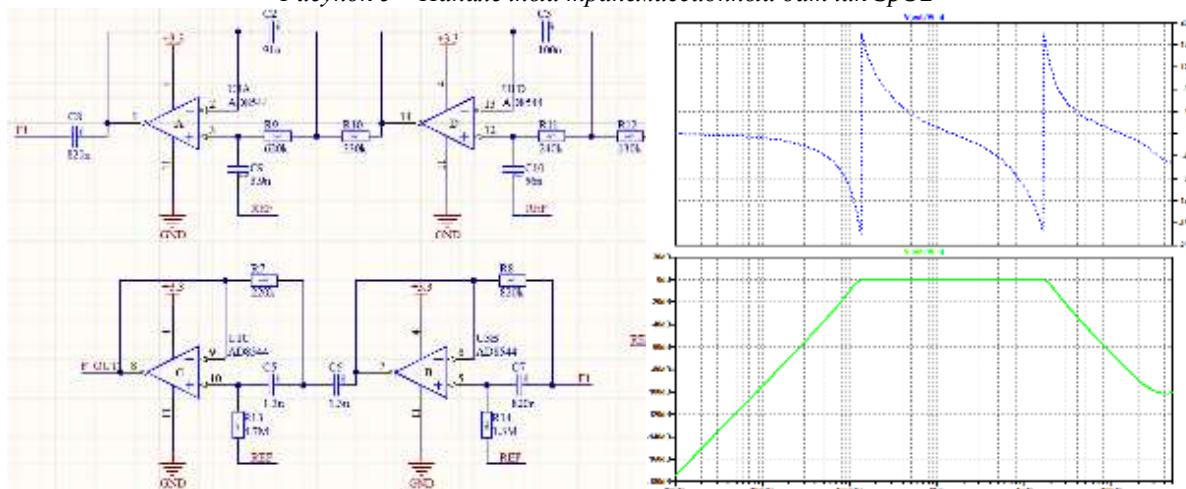


Рисунок 6 – Полосовой фильтр и его АЧХ/ФЧХ

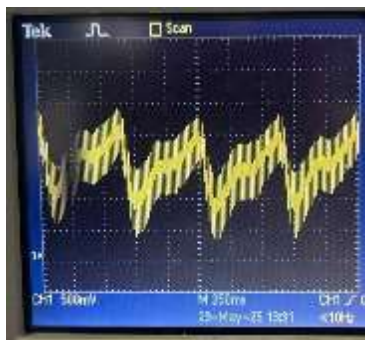


Рисунок 7 – Осциллограмма полного снятого сигнала для двух светодиодов

Центральный микроконтроллер и модуль отображения

Роль вычислительного ядра и пользовательского интерфейса выполняет модуль ESP32-S3-LCD-1.69 компании Waveshare. Он оснащён двухъядерным микроконтроллером ESP32-S3 с тактовой частотой 240 МГц, поддержкой Wi-Fi и Bluetooth 5 LE, 512 КБ SRAM и возможностью подключения внешней памяти PSRAM. Встроенный 1.69-дюймовый IPS-дисплей с разрешением 240×280 пикселей обеспечивает высокую яркость и широкие углы обзора. Внешний вид модуля показан на рисунке 8. Аппаратная поддержка декодирования JPEG и совместимость с графической библиотекой LVGL делают этот модуль оптимальным для создания автономного носимого устройства с удобным интерфейсом.



Рисунок 8 – Модуль ESP32-S3-LCD-1.69 компании Waveshare

Разработка печатной платы аналогового модуля и корпуса

Для обработки сигнала с датчика и обеспечения всех интерфейсов разработана принципиальная электрическая схема и топология печатной платы (ПП) аналогового модуля. Ключевыми добавленными компонентами являются вибромотор для тактильной индикации и разъём USB Type-C, выполняющий две функции: зарядку аккумулятора и подключение внешнего датчика сатурации. Связь с основным модулем ESP32-S3 осуществляется через шлейф JST-SH. При проектировании ПП особое внимание уделялось минимизации толщины, чтобы в итоговом устройстве избежать излишнего объёма. На рисунке 9 представлена 3D-модель печатной платы. Успешные тесты с питанием от аккумулятора подтвердили работоспособность модуля.

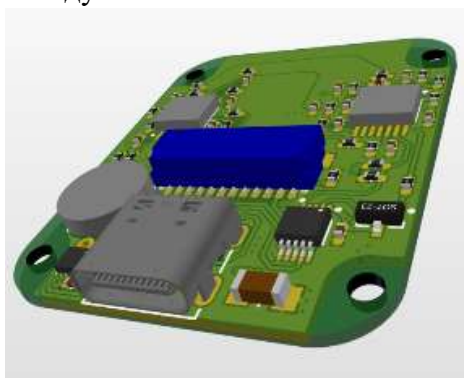


Рисунок 9 – 3D-модель спроектированного модуля

На основе собранной конструкции был спроектирован и напечатан на 3D-принтере корпус, позволяющий закрепить устройство на руке с помощью ремешка. На рисунке 10 приведен собранный вид всего модуля.



Рисунок 10 – Итоговый вид собранного макета

Заключение и перспективы

В ходе выполнения проекта был проведён полный цикл разработки носимого устройства для мониторинга витальных показателей пользователя от теоретического обоснования до создания работающего прототипа. Установлено, что как рефлективная пульсоксиметрия на базе датчика MAX30102, так и трансмиссионная на базе напалечного датчика требует тщательной аналоговой фильтрации и экранирования от внешней засветки. Предложенный полосовой фильтр эффективно подавляет помехи и выделяет полезный сигнал. Разработанная печатная плата аналогового модуля с поддержкой USB Type-C и вибромотором интегрируется с основным контроллером ESP32-S3, образуя компактную носимую конструкцию в напечатанном корпусе.

В дальнейшем планируется более детально проанализировать рынок кольцеобразных датчиков сатурации для замены громоздкого напалечника, что может повлиять на схему аналогового модуля и конструкцию корпуса. Разработанный прототип представляет собой перспективную основу для создания доступного и эргономичного медицинского гаджета для удалённого мониторинга состояния пациентов.

Список литературы

1. Nitzan M., Romem A., Koppel R. Pulse oximetry: fundamentals and technology update // Med Devices (Auckl). 2014. Vol. 7. P. 231–239. doi: 10.2147/MDER.S47319.
2. Mejía-Mejía E., Allen J., Budidha K., El-Hajj C., Kyriacou P.A., Charlton P.H. Photoplethysmography Signal Processing and Synthesis // Photoplethysmography. Elsevier, 2021.
3. Lopes J.M., Xavier M.R., Gean G., Ripardo A.R., Cancelo E., Albuquerque V.H.C. Photoplethysmography for Heart Rate Variability Monitoring: A Review // Sensors. 2018. Vol. 18. No. 6. P. 1894.
4. Kim K.B., Baek H.J. Photoplethysmography in Wearable Devices: A Comprehensive Review of Technological Advances, Current Challenges, and Future Directions // Electronics. 2023. Vol. 12. No. 2923. P. 1–24.
5. Joshi A., Phatak M. Heart Rate Variation Analysis for Predicting Heart Conditions Using PPG and ECG Data: A Review // J INFORM SYSTEMS ENG. 2025. Vol. 10. No. 24s. P. 29–34.
6. Namvari M., Lipoth J., Knight S., Jamali A.A., Hedayati M., Spiteri R.J., Syed-Abdul S. Photoplethysmography Enabled Wearable Devices and Stress Detection: A Scoping Review // J. Pers. Med. 2022. Vol. 12. No. 11. P. 1792. doi: 10.3390/jpm12111792.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОТНЫХ И ОСНОВНЫХ ЦЕНТРОВ ЛЬЮИСА И БРЁНСТЕДА МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

МАГАЗИНОВ А.А., ГАГАРИНА А.Ю., СПИВАК Ю.М.

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

Аннотация. В работе предложена методика визуализации кислотно-основных центров на поверхности пористого кремния (ПК), основанная на картировании сил адгезии с помощью атомно-силовой микроскопии в гибридном режиме. Разработанный подход позволяет установить локальное распределение центров различной природы. Показано, что после функционализации поверхности ПК органическими индикаторами на картах адгезии регистрируются области с повышенным контрастом, коррелирующие с распределением кислотно-основных центров.

Ключевые слова: пористый кремний, прыжковая атомно-силовая микроскопия, кислотно-основные центры, метод Танабе, картирование адгезии.

Введение

Пористый кремний (ПК) на протяжении последних десятилетий остается одним из актуальных материалов в области нанотехнологий и оптоэлектроники благодаря своей высокой удельной площади поверхности и фотолюминесцентным свойствам. Однако для практического применения этого материала в химических сенсорах [1], катализе [2] и биомедицинских устройствах [3] решающее значение имеет не только морфология его пор, но и химическая природа активных центров на его поверхности. Поверхность ПК в обычных условиях чаще всего частично оксидирована и насыщена гидроксильными группами (Si-OH), силанольными мостиками (Si-O-Si) и гидридами кремния (Si-H) [4-5]. Понимание того, какие центры доминируют на поверхности и как можно влиять на их состав и распределение, позволяет предсказать, как материал будет взаимодействовать с полярными и неполярными молекулами, как будет осуществляться функционализация отдельных химических соединений на поверхности ПК, как будет протекать каталитическая реакция. Таким образом, установление корреляции между условиями получения ПК (током анодирования, типом подложки, постобработкой) и распределением кислотно-основных центров на его поверхности является важной прикладной задачей.

Наиболее распространенным методом анализа адсорбционных центров является метод Танабе [6]. Метод Танабе, основанный на спектрофотометрической регистрации адсорбции индикаторов, позволяет количественно и качественно оценить соотношение различных адсорбционных центров на поверхности исследуемого образца. Однако такая оценка носит интегральный характер и не дает никакой информации о взаимосвязи геометрии образца с локализацией адсорбционных центров разной природы. Поскольку для наноматериалов поверхность играет определяющую конечные физико-химические и оптические свойства роль, возникает необходимость разработки методов, позволяющих охарактеризовать распределение адсорбционных центров на наномасштабе.

С учетом выше сказанного, цель данной работы – изучить возможность применения прыжковой атомно-силовой микроскопии (гибридный режим) для картирования особенностей локального распределения адсорбционных центров разного типа на поверхности на примере пористого кремния.

Экспериментальная секция

Образцы пористого кремния были получены анодным электрохимическим травлением пластин монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 с кристаллографической ориентацией (111) в стеклоуглеродном тигле в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты. Анодирование осуществлялось в гальваностатическом режиме при плотностях тока анодирования 30 и 80 мА/см²; время травления каждого образца составило 10 минут. По завершению анодирования образцы дополнительно обрабатывались в 20% растворе HF для удаления скин-слоя, после чего последовательно промывались в изопропиловом спирте и деионизированной воде.

Функционализацию поверхности осуществляли путём адсорбции органических индикаторов из водных растворов. Использовались три индикатора с различными значениями показателя кислотности: метиловый красный (МК) с $pK_a = +5,0$, бромкрезоловый пурпурный (БКП) с $pK_a = +6,4$, этиленгликоль (ЭГ) с $pK_a \approx +14,2$. Растворы готовились смешиванием навесок индикаторов с дистиллированной водой. Концентрация МК составила 0,000316 г/л, БКП – 0,000328 г/л, ЭГ – 0,000321 мл/л. Образцы ПК выдерживались в растворах индикаторов в течение 72 часов, затем промывались в дистиллированной воде в течение двух суток и сушились при комнатной температуре. Технологические условия получения образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технологические параметры получения образцов

Обозначение образца	Плотность тока j , мА/см ²	Индикатор
30ПК	30	Без индикатора
80ПК	80	Без индикатора
30ПК+МК	30	МК
80ПК+МК	80	МК
30ПК+БКП	30	БКП
80ПК+БКП	80	БКП
30ПК+ЭГ	30	ЭГ
80ПК+ЭГ	80	ЭГ

Исследование поверхности проводилось на сканирующем зондовом микроскопе марки NTEGRA PRIMA (ООО «Активная фотоника», Зеленоград). Все измерения выполнялись в гибридном режиме (Hybrid Mode) программного комплекса NOVA SPM, обеспечивающем синхронную регистрацию топографии и карт адгезионных сил без латерального смещения зонда. Использовались кремниевые зонды серии HA_NC(A) с резонансной частотой ~240 кГц и силовой константой 1-10 Н/м. Область сканирования составила 5×5 мкм, разрешение 256×256 точек.

Результаты и обсуждения

Было установлено, что для чистой серии ПК наблюдается достаточно равномерное распределение сил адгезии по поверхности вне порового пространства: для 30ПК это значение варьируется в диапазоне от -1,1 нН до -3,4 нН, а для 80ПК – от -1,0 до -3,0 нН. Для чистого 30ПК преобладают слабые центры адгезии: доля областей с силой адгезии в диапазоне от -1,0 до -2,0 нН составляет 57,3% от сканируемой площади. Зоны с умеренной адгезией (от -3,5 до -7,0 нН) занимают лишь 4,5%.

При функционализации поверхности ПК органическими индикаторами наблюдается возникновение центров повышенной адгезии, которые можно идентифицировать как локальную химическую специфичность. Эти центры можно интерпретировать как места

селективного связывания молекул индикаторов с поверхностью ПК через реактивные группы, что приводит к максимальному силовому взаимодействию с зондом АСМ.

Заключение

На примере нескольких типов кислотно-основных центров экспериментально продемонстрирована возможность локального обнаружения распределения специфических адсорбционных центров по различным типам поверхности. В гибридном режиме АСМ было обнаружено, что после модификации поверхности образцов ПК определенным типом индикатора на картах адгезии появились области с силой адгезии более 8,0 нН (по модулю). Это было типичной характеристикой всех шести различных серий образцов (серии пористого кремния, полученные при 30 и 80 мА/см², каждая из которых была модифицирована одним из трех индикаторов). Это значительно отличается от пористого кремния той же серии (30 и 80 мА/см² соответственно) до модификации: чистая поверхность ПК демонстрировала типичные силы адгезии менее 4,5-5,0 нН (по модулю), измеренные в гибридном режиме АСМ.

Список литературы

1. Биленко Д. И. и др. Сенсоры газовых сред на основе пористого кремния //Микросистемная техника. – 2001. – №. 11. – С. 4-4.
2. Антропов А. П. и др. Нанокompозитные микромощные альтернативные источники энергии для электронной техники //Теплоэнергетика. – 2021. – №. 1. – С. 21-29.
3. Мошников В. А., Леньшин А. С., Спивак Ю. М. Пористый кремний и его применение в биомедицине //Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине. – 2015. – С. 70-116.
4. Спивак Ю. М. и др. Способ получения и пример лекарственной функционализации поверхности наночастиц пористого кремния //Биотехносфера. – 2017. – Т. 3. – С. 69.
5. Spivak, J. M., Gagarina, A. Y., Kozodaev, D. A., & Moshnikov, V. A. (2025, July). Novel Technique for Detecting Localization of Acid and Base Lewis and Bronsted Surface Sites Based on Atomic Force Microscopy. In 2025 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO) (pp. 300-304). IEEE.
6. Танабе К. Твердые кислоты и основания. – М.: Мир, 1973. – Т. 22.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВАЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ИТТЕРБИИ ПРИ АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ СО

МАГАНОВ А.А.^{1,2}, КУЗЬМИН М.В.²

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В.И. Ульянова (Ленина), факультет электроники, Санкт-Петербург, Россия*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. С помощью методов электронной Оже-спектроскопии и контактной разности потенциалов для измерения работы выхода исследовано влияние температуры на валентный переход $2+ \rightarrow 3+$ в нанопленках иттербия при формировании мономолекулярного адсорбированного слоя монооксида углерода. Установлено, что при увеличении температуры от 295 до 380 К указанный переход частично блокируется. Предложен механизм блокировки валентного перехода. Показано, что при увеличении температуры значительную роль в наблюдаемом эффекте играет изменение среднего расстояния адсорбированных молекул от поверхности, что, в свою очередь, приводит к уменьшению вероятности электронных переходов между пленкой иттербия и адсорбированным слоем.

Ключевые слова: поверхность, адсорбированный слой, иттербий, валентный переход, электронная Оже-спектроскопия, работа выхода.

В последнее время большой интерес с научной и практической точки зрения вызывают нанoadсорбенты [1]. Этот интерес обусловлен тем, что для таких объектов, в отличие от стандартных массивных подложек макроскопических размеров, «удельный вес» поверхности может составлять существенную величину (до 50% и более). Это означает, что явления, происходящие на поверхности нанoadсорбентов, могут оказывать значительное влияние на физико-химические свойства образца как целого и, следовательно, использоваться для создания материалов с заданными свойствами.

Недавно было показано, что свойства пленок иттербия наноразмерной толщины (от 0.4 до 20-30 nm) могут быть кардинальным образом модифицированы путем адсорбции на их поверхности слоев молекул монооксида углерода [2]. Так, например, при адсорбции таких молекул в иттербии может происходить валентный переход $\text{Yb}^{2+} (4f^{14}6s^2) \rightarrow \text{Yb}^{3+} (4f^{13}5d^16s^2)$, который в свою очередь сопровождается целым рядом других трансформаций [3]. В указанных экспериментах нанопленочные структуры создавались на кремниевой подложке при температуре 290-300 К. В то же время неясно, будут ли рассмотренные процессы протекать при более высоких температурах. Для получения ответа на этот вопрос кремниевая подложка не может быть использована, так как на границе раздела иттербий-кремний уже при температурах ~350-400 К возможна диффузия атомов полупроводника в пленку металла. В настоящей работе была поставлена цель исследовать влияние температуры на валентный переход в нанопленках иттербия при адсорбции молекул СО. Для этого пленки иттербия создавались на вольфрамовой подложке с преимущественным выходом на поверхность грани (100).

Эксперименты проводились *in situ* в сверхвысоковакуумной установке с базовым давлением $< 1 \cdot 10^{-10}$ Торр. Установка была оборудована электронным Оже-спектрометром, системой для измерения работы выхода методом контактной разности потенциалов (КРП), дифрактометром медленных электронов и магнитным секторным масс-спектрометром. Основными методами, используемыми в данной работе, были электронная Оже-спектроскопия (ЭОС) и КРП. Очистка поверхности вольфрамовой подложки от примесей углерода производилась путем напуска кислорода в вакуумную камеру при температуре образца 1600 К. Нагрев осуществлялся пропусканием постоянного тока через образец. Температура измерялась оптическим и инфракрасным пирометрами. Иттербий наносился на подложку из танталовой ампулы со скоростью осаждения 1 монослой (ML) в минуту. Адсорбция СО проводилась при парциальном давлении $2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Парциальное давление остальных остаточных газов во время адсорбции СО было не более $2 \cdot 10^{-9}$ Торр. Для создания насыщенного адсорбированного слоя молекул СО на поверхности иттербия использовалась доза 480 Лэнгмюр [2].

На рис. 1 снизу показан Оже-спектр для пленки Yb толщиной 40 ML до адсорбции СО (кривая синего цвета). На нем наблюдаются две характерные особенности в области энергий 170-180 eV, обозначенные А и В. Такая форма линии соответствует образцам двухвалентного металлического иттербия. Форма этого спектра не изменяется при увеличении температуры образца до 600 К.

После формирования адсорбированного слоя СО на поверхности иттербия происходит трансформация формы Оже-спектра. Оже-линия, полученная в случае, когда адсорбция происходит при 295 К, представлена на рис. 1 красным цветом. На ней присутствует характерная особенность С (~175 eV), а особенности А и В исчезают. Такая форма линии соответствует трехвалентному иттербию и означает, что в пленке произошел переход Yb^{2+}

→ Yb^{3+} [4]. Глубина, на которую такой переход распространяется в пленку, составляет не менее 16 ML.

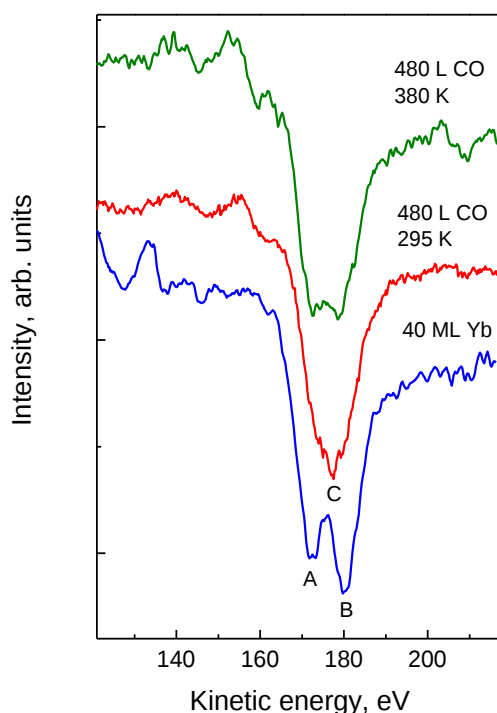


Рис. 1. Оже-спектры системы $\text{Yb}(40 \text{ ML})\text{-W}$ до и после адсорбции CO при различных температурах (295 и 380 K)

Несколько иная картина наблюдается в случае, когда температура, при которой производится адсорбция, выше комнатной. На рис. 1 зеленым цветом показан Оже-спектр иттербия с адсорбированным слоем CO , полученным при температуре 380 K. Как следует из анализа его формы, в этом случае переход из двухвалентного состояния в трехвалентное частично блокируется. Следует отметить, что характер адсорбции молекул (недиссоциативный) и степень заполнения адсорбционного слоя не зависят от температуры.

Для объяснения полученных результатов предложена модель, являющаяся дальнейшим развитием представлений об электронных процессах в объеме и на поверхности пленок иттербия при адсорбции молекул CO . Согласно этой модели, при малых концентрациях адсорбата связь с поверхностью формируется за счет переноса заряда с 5σ -орбитали молекул в иттербий. Появление дополнительного заряда, локализованного на поверхности, приводит к увеличению кулоновского расталкивания в электронном газе нанопленки. При дальнейшем увеличении количества адсорбата на поверхности указанное возмущение в иттербии нарастает, что приводит к обратному переходу электронов из пленки на незаполненные $2\pi^*$ -орбитали молекул, сопровождаемому валентным переходом $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$. При увеличении температуры среднее расстояние между адсорбированными молекулами и поверхностью повышается. Это означает, что вероятность электронных переходов на поверхности уменьшается. Это и является причиной блокирования валентного перехода.

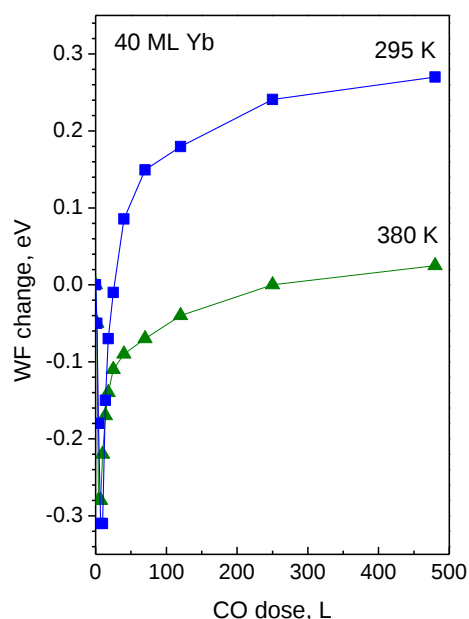


Рис. 2. Изменение работы выхода структуры CO-Yb-W (40 ML Yb) в зависимости от дозы напуска CO при 295 и 380 K

Для проверки рассмотренной модели были проведены измерения изменений работы выхода структур CO-Yb-W как функций дозы напускаемого газа при 295 и 380 K (рис. 2). Обе зависимости имеют похожий характер. При малых количествах молекул на поверхности работа выхода быстро падает. Это соответствует электронным переходам из адсорбированного слоя в пленку. При увеличении дозы CO падение работы выхода сменяется ее ростом. Это обусловлено выдавливанием электронов из пленки в молекулы. Но есть и различия между кривыми. Увеличение работы при 380 K примерно вдвое меньше, чем при 295 K. Это находится в полном согласии с предложенной моделью. Следует отметить, что, согласно данным на рис. 2, при 295 K при полном заполнении адслоя молекулы находятся в виде отрицательно заряженных молекулярных ионов CO⁻. При 380 K их состояние близко к нейтральным частицам.

Закключение

Показано, что увеличение температуры от 295 до 380 K приводит к частичному блокированию валентного перехода $2^+ \rightarrow 3^+$ в пленках иттербия толщиной от 20 до 80 ML при формировании на поверхности мономолекулярного слоя монооксида углерода. Предложена модель, позволяющая объяснить это блокирование. Согласно этой модели, при повышении температуры увеличивается среднее расстояние адсорбированных молекул от поверхности. Это увеличение приводит к уменьшению вероятности перехода электронов из пленки на незаполненные орбитали CO. Это и сдерживает переход иттербия в трехвалентное состояние.

Список литературы

1. Ghaedi M. (Ed.). Adsorption: Fundamental Processes and Applications. Interface Science and Technology, vol. 33. Amsterdam: Elsevier, 2021. С. 412.
2. Митцев М.А., Кузьмин М.В., Логинов М.В. Механизм валентного перехода $\text{Yb}^{2+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$, происходящего в нанопленках иттербия при хемосорбции на их поверхности молекул CO и O₂ // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 10. С. 2054–2058.

3. Кузьмин М.В., Митцев М.А. Термические свойства наноструктур $\text{CO}-\text{Yb}$ -подложка // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 742–747. DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52380.312-21.
4. Кузьмин М.В., Митцев М.А. Модификация электронных свойств поверхности и объема пленок иттербия нанометровой толщины, вызываемая адсорбированными молекулами CO // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 3. С. 577–584.

ВЫСОКОСИММЕТРИЧНЫЕ АНАЛОГИ МОЗАИКИ ПЕНРОУЗА

МАДИСОН П.А., МАДИСОН А.Е.

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

Аннотация. Построение квазикристаллических мозаик с осями симметрии высоких порядков является важной задачей наноархитектоники, в частности, при создании структур нанопотоники и наноплазмоники, предназначенных для управления топологическим зарядом оптических вихрей и достижения эффекта локализации света в двумерных фотонных квазикристаллах. Представлены примеры самоподобных мозаик (аналогов мозаики Пенроуза) с симметрией 7-го и 9-го порядков. Использование ромбов в качестве плиток базового набора приводит к неоднозначности (поливариативности) разбиения. Предположительно для построения 2D-мозаик следует использовать зононы вместо ромбов аналогично тому, как для 3D-разбиений использовались зоноэды вместо ромбоэдров.

Ключевые слова: квазикристаллы, самоподобие, разбиение, гептагональная симметрия.

Построение квазикристаллических мозаик – аналогов разбиения Пенроуза, но с осями симметрии более высоких порядков, например, с симметрией 7-го и 9-го порядков – является важной задачей для создания новых материалов наноархитектоники [1]. Особый интерес представляет рациональный дизайн структур нанопотоники и наноплазмоники для управления топологическим зарядом оптических вихрей и достижения эффекта локализации в двумерных фотонных квазикристаллах [2]. Также большой интерес представляет создание наноструктур из квазикристаллических блоков со структурно-когерентными границами с использованием принципов модульного дизайна интерфейсов [3].

Для решения этих задач требуется разработка соответствующей теории, в рамках которой было бы возможно построение мозаик с осями симметрии высоких порядков. В частности, однозначный алгоритм построения мозаики с симметрией 7-го порядка был предложен Данцером [4,5], однако мозаики Данцера не обладали свойством самоподобия. Задача построения самоподобных мозаик с повторяющимися характерными мотивами из семиконечных звезд была впервые решена в работах [6,7]. Мозаики строились на основе базисного набора различных ромбов, углы в вершинах которых кратны $2\pi/14$. При этом ромбы одинаковой формы и размеров могли иметь разные правила подстановок. Количество неэквивалентных ромбов в базисном наборе для одной из самых важных мозаик с симметрией 7-го порядка позже удалось уменьшить [8].

Если при построении квазикристаллических мозаик с осями симметрии высоких порядков в качестве плиток базового набора используются ромбы, то возникает проблема неоднозначности (поливариативности) разбиения. Определенные фрагменты мозаики могут быть заменены на эквивалентные блоки из других плиток – это так называемые фазонные перескоки (*phason flips*).

Аналогичная проблема имеет место и для икосаэдрических упаковок. Использование двух типов «золотых» ромбоэдров (так называемое 3D-разбиение Амманна-Крамера-Нери на вытянутые и сплюснутые ромбоэдры) приводит к неоднозначности процедуры про-

ецирования из пространства повышенной размерности и нарушению точной икосаэдрической симметрии. Нам удалось показать, что использование четырех типов зоноэдров вместо двух типов ромбоэдров позволяет описать все известные на сегодняшний день типы икосаэдрических квазикристаллов однозначным образом [9-11].

Мы предполагаем, что для 2D-мозаик следует использовать зоногоны вместо ромбов аналогично тому, как для 3D-разбиений использовались зоноэдры вместо ромбоэдров. Предположительно, аналогичный подход может быть применен для квазикристаллических мозаик с симметрией 9-го порядка и выше. В литературе публикации о самоподобных мозаиках с симметрией 9-го порядка отсутствуют. Нами были получены предварительные результаты, свидетельствующие о возможности их построения в рамках единого теоретического подхода. Это откроет новые возможности для решения нескольких конкретных задач по созданию новых материалов и систем обработки информации. Топологический рисунок, основанный на сгенерированных мозаиках, планируется перенести на полимерные подложки методами атомно-силовой микроскопии и исследовать процессы дифракции на таких квазикристаллических структурах.

Характерные фрагменты квазикристаллических мозаик с симметрией 7-го и 9-го порядков обладают несомненной эстетической ценностью. В полученных примерах ромбических мозаик с симметрией 7-го порядка базовый набор плиток содержит ромбы трех типоразмеров, хотя число правил инфляции-дефляции и характерных фрагментов (*patches*) несколько больше. Базовый набор для построения мозаики с симметрией 9-го порядка содержит четыре типоразмера ромбов, но число правил инфляции-дефляции и характерных узоров также больше.

Мы полагаем, что использование зоногонов вместо ромбов позволит, во-первых, решить проблему неоднозначности алгоритма. Во-вторых, такой подход должен приводить к идентичным результатам вне зависимости от того, осуществляется ли генерация мозаик на основе теории разбиений или путем проецирования из многомерных пространств.

Список литературы

1. Налимова С.С., Мошников В.А. Новые материалы наноархитектоники // Нано- и микросистемная техника. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 55-67.
2. Wang P., Fu Q., Konotop V.V., Kartashov Y.V., Ye F. Observation of localization of light in linear photonic quasicrystals with diverse rotational symmetries // Nature Photon. – 2024. – V. 18. – P. 224-229.
3. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Мошников В.А., Соломонов А.В. Модульный дизайн интерфейсов в наноструктурах из квазикристаллических блоков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28. – № 2. – С. 80-93.
4. Danzer L. Exotic triangular tilings of the plane – A model for new aperiodic crystals? // Symmetry: Culture and Science. – 1995. – V. 6. – № 1. – P. 133-136.
5. Nischke K.P., Danzer L. A construction of inflation rules based on n -fold symmetry // Discrete. Comput. Geom. – 1996. – V. 15. – № 2. – P. 221-236.
6. Madison A.E. Tiling approach for the description of the sevenfold symmetry in quasicrystals // Struct. Chem. – 2017. – V. 28. – № 1. – P. 57-62.
7. Madison A.E. Constructing Penrose-like tilings with 7-fold symmetry // Struct. Chem. – 2018. – V. 29. – № 2. – P. 645-655.
8. Stampfli P., Schaad T.P. Ptolemy, the regular heptagon, and quasiperiodic tilings // 2022 Bridges Conference: Conf. Proc. – Helsinki and Espoo, Finland. – 2022. – P. 135-142.
9. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Мошников В.А. Концепция элементарных ячеек в теории квазикристаллов // ЖТФ. – 2024. – Т. 94. – № 4. – С. 561-574.
10. Мадисон А.Е., Мадисон П.А. Теория строения икосаэдрических квазикристаллов: общие принципы // ЖТФ. – 2024. – Т. 94. – № 12. – С. 2123-2134.
11. Мадисон А.Е., Мадисон П.А. Теория строения икосаэдрических квазикристаллов: типы упаковок // ЖТФ. – 2025. – Т. 95. – № 1. – С. 56-78.

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

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 V