

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника кафедры
общей физики «Воронежского государственного университета»

Рябцева Станислава Викторовича

на диссертацию Пермякова Дмитрия Сергеевича «Разработка
технологического процесса изготовления пленок ZnO:Al для планарных
мемристорных матриц с фотодиодным селектором» представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. «Электронная
компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

АКТУАЛЬНОСТЬ

Диссертация Пермякова Д.С. посвящена решению актуальной задачи в микроэлектронике: разработке перспективных материалов и методов их синтеза применительно к устройствам нового поколения, в частности, мемристоров с фотодиодным селектором (МФС). Автором предложен инновационный подход к созданию высокопроводящих и прозрачных пленок на основе оксида цинка (ZnO), легированного алюминием (Al), изготовленных с использованием жидкостных методов синтеза (спрей-пиролиз и золь-гель), совместимых с планарной технологией. Несмотря на широкую изученность ZnO, выбранная тема обоснована возрастающим интересом к нейроморфным устройствам, что подтверждается необходимостью повышения производительности и энергоэффективности микроэлектроники. Работа включает в себя исследование свойств полученных пленок, разработку технологического процесса синтеза и автоматизированного оборудования для повышения воспроизводимости параметров. Особое внимание уделено решению проблемы токов утечки, свойственной мемристорам, путем создания оригинальной конструкции МФС, в которой фототок компенсирует утечки. Значимость работы подтверждается разработанным лабораторным регламентом, патентами, внедрением результатов на производстве и возможностью использования разработанных материалов в реальных устройствах. Таким образом, диссертация направлена на практическое применение полученных результатов и представляет интерес для современной электроники, сочетая научную новизну и практическую значимость.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Разработан новый многостадийный спрей-пиролизный метод синтеза, металлооксидных плёнок ZnO, легированных алюминием, позволяющий в едином автоматизированном технологическом процессе распылять аэрозоль, понизить температуру синтеза до 573 К и изготавливать высококачественные слои с воспроизводимыми морфологией и электрофизическими свойствами.

Установлено влияние природы легирующей примеси на электрическую проводимость синтезируемых плёнок ZnO, идентифицировано отсутствие температурной зависимости их проводимости от отжига в температурном диапазоне 298 - 598 К, как и уменьшение постоянной решетки ZnO, и определена величина энергия активации донорной примеси Al.

Показано, что легирование плёнок ZnO алюминием в широком диапазоне концентраций практически не влияет на их прозрачность (пропускную способность) в спектральном диапазоне длин волн 300 - 1100 нм, что позволяет использовать их в качестве оптически эффективного материала в фотоселекторных мемристорах.

Продемонстрирована эффективность последовательно подключённого к мемристоругетеропереходного фотодиода, изготовленного на основе плёнки ZnO легированной алюминием, для компенсации токов утечки, объединенных в кроссбар-матрицу мемристоров.

Показано улучшение доступа и расширение рабочего диапазона длин волн падающего излучения, за счет использования ZnO:Al в качестве оптического окна гетероструктурного фотоселектора.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Разработан многостадийный спрей-пиролизный метод синтеза металлооксидных плёнок ZnO:Al, обеспечивающий получение высококачественных слоёв с контролируемой морфологией и электрофизическими свойствами при сниженной температуре синтеза. Установлено влияние природы легирующей примеси на электрофизические характеристики плёнок ZnO, отсутствие температурной зависимости проводимости после отжига в заданном диапазоне, а также уменьшение постоянной решетки, подтверждают механизм статического замещения ионов двухвалентного Zn^{2+} трехвалентным Al^{3+} .

Доказано, что легирование ZnO алюминием в широком диапазоне концентраций не оказывает существенного влияния на его оптические свойства, обеспечивая его пригодность в фотоселекторных мемристорах. Показана эффективность гетеропереходного фотодиода, интегрированного в структуру мемристора на основе ZnO:Al, в компенсации токов утечки в кроссбар-матрицах. Кроме того, показана возможность улучшения доступа и расширения рабочего диапазона длин волн падающего излучения за счёт использования ZnO:Al в качестве оптического окна гетероструктурного фотоселектора.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация Пермякова Д.С. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 101 наименования. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, в том числе 55 рисунков и 3 таблицы.

Во **введении** автор в общем виде определяет объекты исследования и формулирует проблему.

В первой главе рассматривается перспективность мемристорных устройств и их фундаментальная проблема – токи утечки, а также методы их устранения, одним из которых является фотоселектор. Обосновывается целесообразность применения металлооксидных полупроводников, в частности ZnO, для реализации мемристорных структур и сопутствующей периферии. Особое внимание уделено анализу различных методов синтеза ZnO и сложностям, возникающим при их реализации. Детально проанализированы методы спрей-пиролиза и золь-гель, выделены их достоинства и недостатки. Подчеркивается роль легирования алюминием в улучшении электрофизических свойств оксида цинка. Обозначена необходимость разработки автоматизированного оборудования и технологических решений для интеграции плёнок в планарные устройства.

Во второй главе излагается описание автоматизированных установок, их характеристик. Описаны методики синтеза плёнок по методу золь-гель и спрей-пиролиз.

Третья глава посвящена исследованию свойств синтезированных плёнок, приводится зависимости удельного сопротивления и прозрачности плёнок от концентрации алюминия. Показана зависимость сопротивления от температуры.

Произведено сравнение кристаллографических, оптических и электрических свойств плёнок ZnO:Al , синтезированных золь-гелем, спрей-пиролизом и СПЗГ. Делается вывод о механизме легирования алюминием ZnO . Показана реализация реверсивного режима роста пленок при спрей-пиролизе. Определены энергии активации рекристаллизации плёнки ZnO:Al для определения оптимального времени отжига. Полученные пленки обладают высокой проводимостью, прозрачностью и стабильностью.

В четвертой главе приводится разработанный технологический регламент синтеза пленок ZnO:Al . Предложены конструктивные решения для планарных мемристорных матриц. Показана эффективность фотодиода на основе ZnO:Al для компенсации токов утечки мемристора на основе $\text{Cu}_2\text{O/SnO}_2\text{:Sb}$. Показано различное поведение границ $\text{ZnO:Al/Cu}_2\text{O}$ и $\text{Cu}_2\text{O/SnO}_2\text{:Sb}$, на первой границе образуется фотодиод, исполняющий роль фотоселектора, в то время как на второй границе фотоэффекта нет, но есть полезный мемристивный эффект.

Результаты защищены патентами на полезные модели и внедрены на предприятии АО «НИИЭТ». Основные выводы подтверждают эффективность предложенных методов и перспективность их применения в мемристорах с фотодиодным селектором.

В заключении автор формулирует основные результаты и выводы диссертации.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в диссертации научные положения и выводы опираются на обширные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные с применением поверенного и калиброванного оборудования, современных методов обработки данных и соответствуют принятым физическим теориям и представлениям. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работах других исследователей, что подтверждает их достоверность и научную обоснованность. Результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (Воронеж, 2018); XII Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2019); 24-й и 25-й Международной

конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах» (Воронеж, 2019 и 2022); I Международной научной конференции «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» (Ташкент, Узбекистан, 2020); I-м Воронежском фестивале электроники, науки, робототехники (Воронеж, 2021); XX Отраслевой научно-технической конференции радиоэлектронной промышленности (Воронеж, 2022); Региональном этапе Всероссийского конкурса «Изобретатель года» Фестиваля ВОИР «Наука изобретения для жизни» (Воронеж 2024).

Таким образом, представленные к защите результаты прошли широкую апробацию в российском и международном научном сообществе.

ОБЩАЯ ОЦЕНКА ДИССЕРТАЦИИ И ЗАМЕЧАНИЯ

Диссертация Пермякова Д.С. представляет собой целостное и логически завершённое исследование, вносящее вклад в развитие научного знания и технологий. Работа отличается четкой структурой и последовательным изложением, а полученные результаты представлены полно и детально. Все выводы основаны на личных исследованиях автора. Оформление диссертации соответствует установленным нормам и стандартам, а автореферат выполнен в соответствии с требованиями к объёму и структуре, полно отражая содержание представленной работы.

Между тем, необходимо сделать некоторые замечания.

1. Заявляется различие границ $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ и $\text{Cu}_2\text{O}/\text{SnO}_2$, но не представлено литературных или экспериментальных данных, демонстрирующих эти различия, не объяснено отсутствие фотоэффекта на границе $\text{Cu}_2\text{O}/\text{SnO}_2$. Проводились ли исследования по изменению порядка синтеза слоёв от $\text{SnO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ до $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{SnO}_2$, чтобы подтвердить эффекты на границе влиянием природы веществ, а не влиянием методов синтеза на границу?

2. В работе не представлены статические характеристики как отдельного мемристора, так и мемристора с фотодиодным селектором. Хотя автор утверждает, что мемристор держит своё состояние 24 часа, необходимо провести более подробное исследование природы спонтанных переключений, особенно для мемристора с фотоселектором.

3. Форма ВАХ фотодиода имеет малый фактор заполнения, автор не

объяснят подобную форму и её влияния на работу мемристора с фотодиодным селектором.

Высказанные замечания не умаляют высокой оценки диссертационного исследования Пермякова Д. С. и сводятся в основном к рекомендациям по уточнению деталей или исправлению отдельных технических недочетов.

Считаю, что диссертация Пермякова Дмитрия Сергеевича «Разработка технологического процесса изготовления пленок ZnO:Al для планарных мемристорных матриц с фотодиодным селектором» является завершенной научно-квалифицированной работой и отвечает всем требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым ВАК РФ, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

Рябцев Станислав Викторович



26.09.2025г

Рябцев Станислав Викторович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры общей физики Воронежского государственного университета

Докторская диссертация защищена по научной специальности 01.04.10: Физика полупроводников

Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Телефон: +7 (951) 560-99-11

Электронная почта: ryabtsev@phys.vsu.ru

Подпись Рябцева С.В. заверяю

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Здесь	Рябцев С. В.
Здесь	начальник отдела кадров
Здесь	должность,
Здесь	Т.В. Зарудная 26.09.2025
подпись, расшифровка подписи	