

## 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, мемристорам 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 пленок 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 пленок 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, приводятся 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 Cu<sub>2</sub>O/SnO<sub>2</sub>:Sb. Показано различное поведение границ ZnO:Al/Cu<sub>2</sub>O и Cu<sub>2</sub>O/SnO<sub>2</sub>: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»)

Подпись: Рябцева С.В.

Зарудняя Т.В. начальник отдела кадров  
должность

26.09.2025

подпись, расшифровка подписи