

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., доцента, заведующего кафедрой
нано- и микроэлектроники Пензенского государственного университета
Пронина Игоря Александровича 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 наноэлектроники, квантовых устройств

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Благодаря своим уникальным электрофизическим и оптическим свойствам широкозонные металлооксиды, в частности, оксид цинка, активно исследуются. Эти прозрачные и высокопроводящие полупроводниковые материалы находят применение при изготовлении различных приборов и устройств нано- и микроэлектроники: тонкопленочных транзисторов, УФ-фотодетекторов, фотодиодов, газовых сенсоров, мемристивных устройств и т.д. Мемристивные устройства представляют особый интерес в областях применения искусственного интеллекта и рассматриваются как электронные аналоги синапсов в нейроморфных системах и элементов резистивной памяти. С 2008 года количество публикаций и патентов в этой области растет экспоненциально, а исследования ведутся ведущими научными центрами России, США, Европы, Японии, Кореи и Китая. Однако у таких систем есть фундаментальные проблемы в виде сложных технологий изготовления, низкой стабильности и достаточно высоких токов утечки при объединении мемристоров в матрицу, что ограничивает их массовое внедрение. Преодоление проблем мемристоров возможно за счёт улучшения свойств материалов, лежащих в их основе, и внедрения систем борьбы с паразитными эффектами. В связи с этим существенна нехватка качественных материалов, совмещающих свойства высокой проводимости и прозрачности. Пермяков Д. С. предлагает

инновационный подход к созданию материалов для селекторов мемристорных матриц на основе плёнок ZnO, легированных алюминием, изготовленных жидкостными методами синтеза (спрей-пиролиз, золь-гель), совместимыми с планарной технологией. Также оригинальна сама предложенная автором конструкция мемристора с фотодиодным селектором, решающая проблему токов утечки в кроссбар-матрицах. Эксперименты подтвердили, что фототок компенсирует утечки. Воспроизводимость свойств плёнок обеспечивается автоматизацией оборудования. Особую ценность представляет разработанный лабораторный регламент, а также доказанная применимость плёнок ZnO:Al в реальных устройствах, что подчеркивает не только научную, но и практическую значимость работы.

Таким образом, диссертация Пермякова Д. С. представляет интерес для современной электроники. Новизна подхода, подтверждённая патентами и внедрением решений на производстве, делает тему исключительно актуальной.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Автором разработан метод получения полупроводниковых легированных алюминием плёнок оксида цинка, базирующийся на многостадийном спрей-пиролизе, позволяющий снизить температуру синтеза и получать плёнки с воспроизводимыми структурой и морфологией.
2. На основе данных электропроводности плёнок в широком диапазоне температур определена энергия ионизации примеси алюминия, являющегося донором в решетке ZnO.
3. Установлено, что введение алюминия в плёнки ZnO в рамках метода спрей-пиролиза не влияет на их коэффициент пропускания излучения в широком диапазоне длин волн.
4. Продемонстрирована эффективность последовательно подключённого к мемристору гетеропереходного фотодиода, изготовленного на основе плёнки ZnO, легированной алюминием, для компенсации токов утечки, объединённых

в кроссбар-матрицу мемристоров.

5. Установлено, что использование плёнок ZnO:Al в качестве оптического окна гетероструктурного фотоселектора позволяет расширить рабочий диапазон длин волн падающего излучения.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Автором диссертации установлены ключевые закономерности влияния легирования: выявлено, что введение алюминия существенно изменяет электропроводность ZnO-пленок; определена энергия активации донорных уровней Al (0,142 эВ) в диапазоне 298 – 598 К; зафиксировано уменьшение параметров кристаллической решетки в результате внедрения в неё алюминия; доказан механизм замещения атомов Zn атомами Al.

Показано, что легирование сохраняет оптические свойства материала, а коэффициент пропускания пленок остается высоким (80 – 85 %) в широком спектральном диапазоне.

Продемонстрирована практическая реализация технологии для создания фотоселектора мемристормых матриц. Интеграция ZnO:Al для создания фотодиода приводит к компенсации токов утечки в мемристормых матрицах. Наблюдается расширение рабочего спектрального диапазона за счет оптических свойств ZnO:Al.

Разработан автоматизированный процесс формирования пленок с возможностью одновременного распыления аэрозоля и снижения температуры синтеза до 573 К, что позволяет получать высококачественные слои со стабильными морфологическими и электрофизическими характеристиками.

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** представлен анализ современных исследований в области нейроморфных устройств на основе металлооксидных полупроводников, в частности, ZnO, преимуществ и сложностей их синтеза. Рассмотрены методы получения пленок (спрей-пиролиз, золь-гель), их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено легированию алюминием для модификации электрофизических свойств. Отмечена необходимость разработки автоматизированного оборудования и технологических решений для интеграции пленок в устройства.

Во **второй главе** дается описание объекта исследований, автоматизированных установок, материалов, методических особенностей проведенных исследований и электрофизических измерений. Представлены разработанные автоматизированные установки для спрей-пиролиза и золь-гель метода. Подробно рассмотрены прекурсоры, условия синтеза, температурные режимы и методики нанесения пленок.

Третья глава посвящена влиянию легирования алюминием на свойства пленок ZnO. Установлено, что оптимальная концентрация Al составляет 1 ат.%, что увеличивает проводимость без снижения прозрачности. Описан реверсивный режим роста пленок при спрей-пиролизе и предложены аппроксимационные математические модели для прогнозирования толщины. Показано, что пленки ZnO:Al обладают высокой термической стабильностью и пригодны для создания фотоселекторов мемристорных структур. Приведены результаты испытаний фотоселекторных мемристоров, демонстрирующие компенсацию токов утечки. Произведено сравнение кристаллографических, оптических и электрических свойств пленок ZnO:Al, синтезированных золь-гель методом, спрей-пиролизом и СПЗГ.

В **четвертой главе** показан разработанный технологический регламент синтеза пленок ZnO:Al, предложены конструктивные решения для планарных мемристорных матриц. Полученные пленки обладают высокой проводимостью,

прозрачностью и стабильностью. Результаты внедрены в промышленность и защищены патентами. Основные выводы подтверждают эффективность предложенных методов и перспективность их применения в микроэлектронике.

В **заключении** автор формулирует основные результаты и выводы диссертации.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научные положения и выводы, приведенные в работе, получены на основе большого объема теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием поверенных и калиброванных средств измерений, использованием современных методов обработки экспериментальных данных, непротиворечивостью полученных результатов известным физическим представлениям и теориям, а также согласием с результатами других исследователей. 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); 1-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 логичную и

законченную работу, которая написана ясно и последовательно, а представленные результаты подробно и четко изложены. Все результаты получены автором лично. Оформление диссертации соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований по объему и структуре, полно и точно отражает содержание рассматриваемой диссертационной работы.

Между тем, необходимо сделать некоторые замечания.

1. В литературном обзоре тематика применения оксида цинка в электронике раскрывается достаточно поверхностно, несмотря на его всестороннюю изученность. Также отсутствуют сравнения предложенных методов с альтернативными (например, CVD, магнетронное напыление). Это снижает убедительность аргументов в пользу выбранной методики.

2. Автором установлено, что температурные зависимости электрического сопротивления плёнок ZnO от времени отжига при различных температурах демонстрируют изменение сопротивления в одинаковое количество раз по сравнению с изначальным значением за различные периоды времени; кроме того, сопротивление плёнки в некоторых случаях выходит на «плато». Однако автор не объясняет подобное поведение. Хорошо известно, что при увеличении температуры отжига происходит увеличение размеров кристаллитов, которое должно повлиять и на проводимость плёнки.

3. Аппроксимационные модели роста плёнки с учётом реверсивного роста действительно представляют интерес для технологического регламента синтеза, но автор приводит слишком мало доказательств формирования на поверхности плёнки веществ «травителей» на основе комплексообразующего агента. Гипотеза, определённо, имеет место быть, однако поставить точку в этом вопросе могла бы ИК спектроскопия.

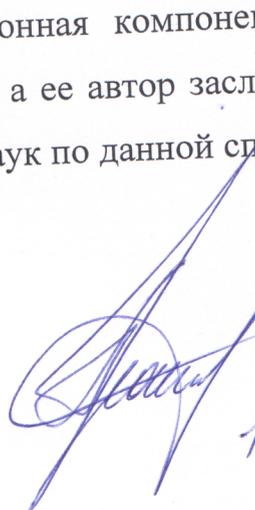
Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации Пермякова Д.С. и носят характер пожеланий или указаний на технические или оформительские недочеты.

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 пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, и соответствует паспорту специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по данной специальности.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент
Пронин Игорь Александрович



11 июля 2025г.

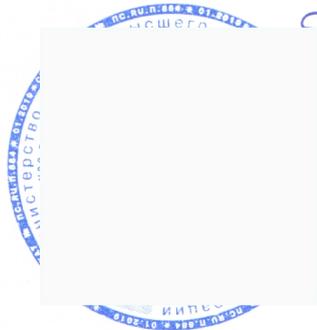
Пронин Игорь Александрович, заведующий кафедрой нано- и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Докторская диссертация защищена по научной специальности 01.04.10 Физика полупроводников.

Адрес: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

Телефон: +7 (8412) 20-83-93.

Адрес электронной почты: pronin@pnzgu.ru, pronin_i90@mail.ru



Громица И. А.
_____ заверяю
секретарь Ученого Совета
_____ О.С. Дорофеева