



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»
(ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», СКГМИ (ГТУ))

«Цагат Кавказаг хаххон - металлургон институт
(падзахадон техногон университет)»

ул. Николаева, д.44, г. Владикавказ, РСО-Алания, 362021,
ОКПО 02069601, ОГРН 1031500350111, ИНН 1501002522
тел.: (8672) 407-101 факс: (8672) 407-203
E-mail: info@skgmi-gtu.ru <http://www.skgmi-gtu.ru>

№

8/4

на №

от

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор- проректор по
НР ИДиСР ФГБОУ ВО «Северо-
Кавказский горно-металлургический
ударственный
кий университет)

С.В. Галачиева

07 2025 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Пермякова Дмитрия Сергеевича, выполненную на тему: «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 темы исследования и анализ содержания работы

Работа посвящена решению актуальной задачи – улучшению свойств и методов синтеза известных материалов, для создания перспективных устройств и развития микроэлектроники. Автор описывает методы синтеза и свойства плёнок ZnO легированных алюминием применительно мемристорам с фотодиодным селектором (МФС). Несмотря на глубокую исследованность свойств оксида цинка, обоснованность выбранной темы не вызывает сомнений, она подтверждается возрастающим интересом к разработке нейроморфных устройств, к которым относится МФС, в связи с необходимостью повышения производительности и энергоэффективности микроэлектронных устройств. Автором подчеркивается важность использования новых материалов и конструкций, а также возможности использования электронно-оптических принципов для обработки, хранения и передачи информации. В работе решается вопрос перехода от теории к практике, через разработку технологического процесса синтеза плёнок оксида цинка и разработку автоматизированного оборудования для синтеза этих плёнок, что в совокупности должно привести к существенному росту воспроизводимой параметров. В работе использованы методы исследования, включающие рентгеновскую дифрактометрию, атомно-силовую

микроскопию, спектрофотометрию и четырехзондовый метод. Описана разработанная модель роста пленок.

Диссертация Пермякова Д.С. изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 3 таблицы и 2 приложения. Список литературы включает 101 наименование.

Во **введении** раскрыта актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель, объект, предмет и методы исследований. Представлены научная новизна, практическая ценность и апробация работы, изложены основные положения, вносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации, обосновывающий актуальность разработки нейроморфных устройств, в частности, МФС, и перспективность металлооксидных полупроводников, таких как ZnO. Рассмотрены основные методы синтеза пленок ZnO:Al, включая спрей-пиролиз и золь-гель, отмечены их особенности, преимущества и недостатки, а также специфика легирования алюминием. В заключение главы сформулирована необходимость разработки технологического регламента и решений для оптимизации процесса изготовления пленок ZnO:Al для применения в МФС.

Во **второй главе** излагается описание объекта исследований, описываются конструкции автоматизированных установок, методических особенностей проведенных исследований и электрофизических измерений. Описывается методика синтеза ZnO:Al золь-гель методом, спрей-пиролизом и смешанным методом СПЗГ.

Третья глава посвящена изучению влияния легирования алюминием (Al) на свойства пленок ZnO, полученных разными методами (золь-гель, спрей-пиролиз, СПЗГ). В главе представлены результаты сравнительного анализа кристаллографических, оптических и электрических свойств пленок ZnO:Al в зависимости от концентрации Al. Доказано замещение ионов Zn ионами Al. Описана особенность спрей-пиролиза в виде режима реверсивного роста плёнки при синтезе из органических прекурсоров. Рассмотрены режимы отжига и их влияние на свойства пленок. Также обсуждается, как легирование Al влияет на электрическую проводимость, прозрачность пленок и их пригодность для создания МФС.

В **четвертой главе** описывается апробация разработанного технологического процесса изготовления пленок ZnO:Al для создания фотоселекторных мемристорных структур (МФС). В ней представлен разработанный лабораторный технологический регламент, включающий 21 технологическую операцию, и описаны результаты апробации полученных пленок в МФС. Также обсуждается предложенная конструкция планарной мемристорной матрицы с фотодиодным селектором и анализируются её основные преимущества, такие как подавление токов утечки и улучшение рабочих характеристик.

Научная новизна.

Научная новизна работы заявлена и подкреплена рядом полученных результатов. Выделяется установление связи между легированием

алюминием и изменением электрофизических свойств пленок. Экспериментально подтверждается замещение цинка алюминием в узлах решетки оксида, что является нетипичным для подобных методик синтеза. Определена энергия активации донорной примеси ZnO:Al (0,142 эВ) в температурном диапазоне до 500 К. Показана реализация реверсивного режима спрей-пиролизного процесса образования тонких пленок ZnO:Al. Описан новый многостадийный спрей-пиролизный метод позволяющий понизить температуру синтеза до 573 К и изготавливать высококачественные плёнки. Предложены оригинальные конструктивные решения в МФС, показана их эффективность в борьбе с токами утечки. Конструктивные решения включают усовершенствования технологических операций регламента для изготовления фотоселектора, позволяющие улучшить доступ и расширить рабочий диапазон длин волн падающего излучения фотоселектора мемристора.

Практическая значимость работы

Результаты работы внедрены в АО «НИИЭТ». Разработан лабораторный технологический регламент, пригодный для изготовления фотоселекторных мемристорных матриц. Предложена конструкция автоматизированной установки спрей-пиролиза, повышающая производительность. Представлена методика борьбы с утечками в мемристорах, что повышает надежность и функциональность разрабатываемых устройств.

Степень обоснованности и достоверности основных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения и выводы, приведенные в работе, получены на основе достаточного 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. Опубликовано достаточное количество статей в рецензируемых изданиях, включая журналы, индексируемые в базах Scopus и Web of Science, что говорит о высокой степени проработки и значимости полученных результатов.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации научных работ соискателя заключается: в установлении режимов спрей-пиролизного процесса образования тонких высокооднородных пленок ZnO:Al; определении типа и механизма электрической проводимости оксидных пленок ZnO, легированных алюминием, в интервале температур 298 - 500 К; в разработанном лабораторном технологическом регламенте процесса изготовления пленок ZnO:Al; в разработанных технических средствах, автоматизирующих процесс синтеза металлооксидных пленок методом спрей-пиролиза; предложенных конструктивно-технологических решениях для изготовления технологической структуры мемристора с фотодиодным селектором на основе

высокопроводящих и оптически прозрачных пленок ZnO:Al.

Оценка диссертационной работы

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 4 – в изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получено 3 патента на полезные модели. Изложение диссертацию характеризуется логичностью и последовательностью решения поставленных задач. Выводы сформулированы в 6 пунктах и соответствуют задачам исследования. Автореферат полностью соответствует материалам диссертации.

Замечания по диссертацию

1. В теоретической части диссертации произведён анализ возможных соединений ZnO и Al, так как одной из задач работы является улучшение электрических характеристик ZnO за счёт легирования алюминием. Автор выделяет возможные соединения по диаграммам состояния ZnO – Al₂O₃ и ZnO – Al, что является приемлемым, но более правильным решением было бы произвести собственный расчёт диаграммы состояния Zn-O-Al с помощью базы данных Thermo-Calc или FactSage.

2. В работе описаны преимущества и новшества разработанных установок, в частности установка спрей-пиролиза, а именно высокая скорость перемещения каретки и 3-х сопельный аппарат распыления аэрозоля, которые никак не используются для создания слоя ZnO.

3. Расчёт оптимальных параметров спрей-пиролиза произведён для растворов на основе изопропилового спирта, но в работе применяются также водные растворы прекурсоров, отличающиеся, плотностью, коэффициентом поверхностного натяжения, теплоёмкостью и т.д. Данное замечание частично нивелируется большим временем испарения для капли водного аэрозоля по сравнению с изопропиловым спиртом, что однозначно не позволит испариться водяным каплям аэрозоля до состояния порошка и делает выбранные параметры спрей-пиролиза приемлемыми, но не оптимальными.

4. Заявляется различие границ ZnO/Cu₂O и Cu₂O/SnO₂, но не представлено литературных или экспериментальных данных, демонстрирующих эти различия, не объяснено отсутствие фотоэффекта на границе Cu₂O/SnO₂. Проводились ли исследования по изменению порядка синтеза слоёв от SnO₂/Cu₂O/ZnO до ZnO/Cu₂O/SnO₂, чтобы подтвердить эффекты на границе влиянием природы веществ, а не влиянием методов синтеза на границу?

5. В работе присутствуют грамматические и орфографические ошибки.

Заключение

Диссертация Пермякова Д. С. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на актуальную тему. Исследования проведены на достаточно высоком научно-методическом уровне, с большим количеством экспериментальных данных и компьютерных симуляций.

Диссертационная работа Пермякова Дмитрия Сергеевича: «Разработка технологического процесса изготовления пленок ZnO:Al для планарных мемристорных матриц с фотодиодным селектором», соответствует критериям актуальности темы, новизны и достоверности результатов, отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2 Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Отзыв составил:

профессор кафедры электронных приборов
доктор технических наук,
доцент



Гончаров Игорь Николаевич

« 3 » 07 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский горно-металлургический
институт (государственный технологический
университет)» ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)
362021, Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ
республика, ул. Николаева, 44; Телефон: +7 (8672)
407-000
Электронный адрес: info@skgmi-gtu.ru
Сайт: www.skgmi-gtu.ru