«УТВЕРЖДАЮ»
Исполняющий обязанности проректора
по научной работе и инновационной деятельности
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Пензенский г университет»,
д наук, доцент
А. Митрохин
февраля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» на диссертационную работу Лопатина Артема Юрьевича на тему «Электрические свойства и термовольтаический эффект в тонких пленках на основе оксида цинка и оксида никеля», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

За последние годы одним из самых интересных событий в области термоэлектричества являлось открытие возникновения аномальной ЭДС при нагреве полупроводниковых материалов на основе моносульфида самария SmS без внешнего градиента температур, получивший название «термовольтаического эффекта». Помимо SmS, термовольтаический эффект обнаружен в ZnO и многих других материалах. В случае возникновения данного эффекта неоднородное легирование приводит к появлению избытка электронов в сильнолегированной части образца, диффундирующих в другую область, и образованию противодействующего поля с соответствующей разностью потенциалов. Это явление представляется чрезвычайно интересным для развития таких направлений технической физики, как разработка мемристоров и сенсорика. При этом мемристоры с такими свойствами перспективны для создания нового поколения нейронных сетей. Техническая реализация градиента концентрации примеси может быть осуществлена путем последовательного нанесения слоя, содержащего примесные атомы

одной концентрации, с последующим нанесением слоев с другой концентрацией примесей. В связи с вышесказанным тема диссертации Лопатина А.Ю., основной целью которой является установление основных закономерностей влияния условий синтеза на электрические свойства тонких пленок ZnO, NiO и термовольтаический эффект в градиентных оксидных пленках на их основе является **актуальной.**

К основным результатам, имеющим несомненную научную новизну, можно отнести следующие:

- Установлено и впервые показано, что в тонких пленках кристаллического ZnO, полученных в смешанной атмосфере методом ионно-лучевого распыления, в области температур выше комнатной реализуется прыжковый механизм проводимости с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Показано, что изменение парциального давления кислорода и температуры подложки при синтезе позволяет управлять плотностью локализованных состояний на уровне Ферми в широких пределах, что определяет электротранспортные и термоэлектрические свойства пленок ZnO.

- Выявлено, что термовольтаический эффект в двухслойных тонкопленочных структурах на основе ZnO:Fe обусловлен внутренней неоднородностью электрофизических свойств, возникающей вследствие градиентного распределения легирующей примеси железа и связанного с ним градиента концентрации носителей заряда. Показано, что при равномерном нагреве таких структур возникает диффузионное перераспределение электронов между слоями с различной концентрацией носителей, формируется внутреннее электрическое поле, а величина термовольтаического напряжения определяется равновесием диффузионной и дрейфовой составляющих потока носителей заряда.

- Для пленок NiO при малом содержании кислорода, равном 6–10 %, в области умеренных температур (до $T = 470$ К) доминирующий вклад в изменение электропроводности вносит термическая активация дырок с

акцепторного уровня (~ 0,48 эВ). При повышении температуры в таких пленках возрастает вклад термоактивированной подвижности поляронов. Пленки, полученные при 15–20 % кислорода, соответствуют переходной области, в которой происходит перестройка дефектной подсистемы и меняется соотношение термоактивированной и прыжковой проводимости. При содержании кислорода 40–50 % сопротивление определяется прыжковой проводимостью между ближайшими центрами, связанными с ионами Ni^{3+}, которые расположены на акцепторном уровне (~ 0,21 эВ).

- Впервые для двухслойных тонкопленочных структур на основе NiO, полученных реактивным высокочастотным магнетронным распылением при различном содержании кислорода в рабочей атмосфере, установлена связь между условиями формирования слоев, знаком и величиной напряжения термовольтаического эффекта.

- Сформирована многослойная градиентная структура в одном технологическом цикле на основе NiO с последовательным изменением содержания кислорода при формировании отдельных слоев. Установлено, что при равномерном нагреве структура демонстрирует изменение знака напряжения на начальном участке и устойчивое напряжение термовольтаического эффекта около 55 мкВ при температуре 425 К.

- Сформирована и экспериментально исследована модельная четырехслойная тонкопленочная структура ZnO:Fe (x_{Fe} = 2,18 %)/ZnO:Fe (x_{Fe} = 0,55 %)/NiO (полученный при 50 % O_2)/NiO (полученный при 40 % O_2), содержащая последовательно соединенные градиентные ветви электронного и дырочного типа проводимости. Показано, что такая структура при равномерном нагреве демонстрирует устойчивое напряжение термовольтаического эффекта порядка 210 мкВ при выдержке в области 623–628 К в течение 8 часов.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии научных представлений о механизмах электрического транспорта и генерации электродвижущей силы в градиентных тонкопленочных оксидных полупроводниковых структурах при равномерном нагреве.

Практическая значимость:

- Установлено, что условия синтеза тонких пленок ZnO и NiO позволяют целенаправленно управлять их электрофизическими и термоэлектрическими свойствами. Для пленок ZnO показано, что изменение состава газовой среды и температуры подложки влияет на плотность локализованных состояний, концентрацию носителей заряда, удельное сопротивление и коэффициент Зеебека. Для пленок NiO установлено, что изменение содержания кислорода в рабочей атмосфере при реактивном магнетронном распылении позволяет управлять дефектным состоянием, электрическим сопротивлением, типом и концентрацией носителей заряда, а также величиной и знаком напряжения термовольтаического эффекта.

- Предложено технологическое решение формирования градиентных тонкопленочных структур на основе оксидных полупроводников n- и p-типа проводимости, в которых внутренний градиент электрофизических свойств создается за счет различного содержания легирующей примеси железа в слоях ZnO:Fe и различного содержания кислорода при напылении слоев NiO. На основе наиболее эффективных ветвей n- и p-типа сформирована модельная четырехслойная структура ZnO:Fe (x_{Fe} = 2,18 %)/ZnO:Fe (x_{Fe} = 0,55 %)/NiO (полученный при 50 % O_2)/NiO (полученный при 40 % O_2), демонстрирующая устойчивое напряжение термовольтаического эффекта порядка 210 мкВ при равномерном нагреве и длительной выдержке в области 623–628 К в течение 8 часов. Тем самым показана принципиальная возможность управления термовольтаическими свойствами тонкопленочных оксидных структур через состав рабочей атмосферы, температуру подложки, содержание легирующих примесей, последовательность нанесения слоев и пространственную неоднородность электрофизических параметров. Показана принципиальная возможность преобразования тепловой энергии в электрическую при отсутствии градиента температур между контактами ветвей преобразователя.

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертации обеспечивается применением современных методов для аттестации исследуемых образцов (рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, методики измерения теплопроводности, электропроводности, термоэдс, эффекта Холла и др.) и подтверждается воспроизводимостью результатов, их сопоставимостью с результатами работ других авторов. Обсуждение опирается на надёжно установленные факты и закономерности. Все выводы работы соответствуют содержанию разделов диссертации.

Рекомендации по использованию результатов работы:

Полученные в диссертации новые знания в области термоэлектрических и термовольтаических свойств оксидных полупроводников и многослойных структур на их основе развивают представления о влиянии условий синтеза на физические свойства полупроводников и могут быть использованы такими научными и производственными коллективами, как НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ФТИ им. Иоффе РАН, (г. С.-Петербург), «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва), Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород) и др.

Изложенные в диссертации результаты хорошо обоснованы и прошли апробацию на международных, межгосударственных и внутривузовских конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 индексируются базами данных Web of Science и Scopus. Получен 1 патент и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. При анализе структуры исследованных пленок автор широко использует результаты рентгено-фазного анализа и только в одном случае для пленки оксида цинка приводит изображение поперечного сечения метом просвечивающей электронной микроскопии. Подобные изображения были бы не лишними не только для однофазных пленок, но и при анализе многослойных пленок, содержащих как градиентные слои, так и слои из разных фаз.

2. В автореферате отсутствуют ссылки на литературу даже в тех случаях, где они очень необходимы. Например, это касается методики измерения термовольтаического эффекта (стр. 10).

3. В диссертации и автореферате сказано, что структуру и фазовый состав синтезированных пленок исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), однако при описании результатов автор не приводит изображений от СЭМ.

4. Как в автореферате, так и в диссертации имеются отдельные опечатки.

Приведенные замечания не уменьшают научной значимости представленной работы и несут исключительно рекомендательный характер.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, которая по актуальности поставленных задач, научной новизне и практической значимости, а также по количеству работ, опубликованных в открытой печати, соответствует квалификационным требованиям пп. 9-14 "Положения о присуждении учёных степеней", утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (со всеми последующими изменениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а её автор,

Лопатин Артем Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв был рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Нано- и микроэлектроника» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» 26.10.2026 года, протокол № 5. Присутствовало на заседании: 8 человек. Результаты голосования: "за" – 8 человек, "против" – нет, "воздержались" – нет.

Заведующий кафедрой «Нано- и микроэлектроника»
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,
доктор технических наук, доцент — Пронин Игорь Александрович

Секретарь кафедры «Нано- и микроэлектроника»
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
старший преподаватель — Рыжова Татьяна Николаевна

Контактная информация:
Адрес: 440026, Приволжский федеральный округ, Пензенская область, г. Пенза, ул. Красная, д. 40
E-mail: rector@pnzgu.ru; nano-micro@pnzgu.ru
Телефон: +7 (8412) 66-64-19

Буонина М.Ф.
ную подпись Гытовой М.М.
ВЕРЯЮ
циалист по кадрам ГЧ1 (Белова С.И.)
26 10 2026 г.