

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.01,

СОЗДАННОГО НА БАЗЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный технический университет»,

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 01.04.2025г. № 386

О присуждении Смирнову Андрею Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структура, термостойкость и электрические свойства многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$, $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ » по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 31.01.2025 г. (протокол заседания № 382) диссертационным советом 24.2.286.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, приказ о создании совета №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Смирнов Андрей Николаевич, 25 октября 1994 года рождения, в 2018 г. окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по направлению 16.04.01. – Техническая физика. В 2022 г. окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. В настоящий момент работает в должности инженера-исследователя в научно-образовательной лаборатории «Функциональные материалы» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Стогней Олег Владимирович, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры твердотельной электроники.

Официальные оппоненты:

1. Юраков Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики твердого тела и наноструктур, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»;

2. Комогорцев Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ «БелГУ», Белгород, в своем **положительном отзыве**, подписанном Тарновским Артуром Игоревичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой теоретической и экспериментальной физики НИУ «БелГУ», и утвержденном проректором по стратегическому развитию, науке и инновациям федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» «НИУ «БелГУ», кандидатом сельскохозяйственных наук, доцентом Скрипниковой Еленой Владимировной, указала, что диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи. В диссертации установлено влияние толщины металлических слоёв на морфологию, термическую устойчивость и электрические свойства многослойных наноструктур металл/оксид, а

также определены механизмы, посредством которых происходит разрушение многослойности полученных плёнок при термическом воздействии. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, а личный вклад соискателя не вызывает сомнения. По теоретической и практической значимости результатов проведенного исследования, актуальности выбранной темы, научной новизне, достоверности и обоснованности, диссертация Смирнова Андрея Николаевича полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Соискатель имеет 30 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 22 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. Так же имеется 1 патент Российской Федерации.

Общий объем опубликованных работ составил 5,25 п.л., из них соискателю принадлежит 1,99 п.л.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Stognei O.V. Influence of the nickel layers thickness on the electrical properties of $(\text{Ni/ZrO})_{45}$ multilayer nanostructures / O.V. Stognei; **A. N. Smirnov**; I.A. Nepochataya; V.A. Kirillova // AIP Conference Proceedings. 2020, V. 2313, P. 030031.

2. Stognei O. V. Multilayer Mg/NbO thin film nanostructures / Stognei O. V; **Smirnov A. N.**; Sitnikov A. V; Semenenko K. I // Solid State Communications. 2021, V. 330, P.114251.

3. Stognei O. V. Phase Transformations in Pure ZrO_2 / O. V. Stognei, **A.N. Smirnov** // AIP Conference Proceedings. 2022, V. 2466, P. 03005.

4. Стогней О. В. Структура и электрические свойства многослойных наноструктур $(\text{Mg/ZrO}_2)_{52}$ / О. В. Стогней, **А. Н. Смирнов**, А. В. Ситников, М. Н. Волочаев // Известия РАН. Серия Физическая. – 2023. – Т. 82. - №. 9. – С. 1348-1354.

5. Stognei O. Thermal Stability of $(\text{Mg}/\text{NbO}_x)_{82}$ Multilayer Nanostructure / O. Stognei, A. Smirnov, A. Sitnikov, M. Volochaev // Phys. Status Solidi A – 2024. - 2400244.

Подготовка публикаций выполнена соискателем совместно с научным руководителем О.В.Стогнеем. Основные результаты диссертации отражены в опубликованных статьях. Работы выполнены на высоком научном уровне, в диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов, все отзывы положительные:

1. **Гончаров Игорь Николаевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электронный приборы» Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) (ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ)), со следующими замечаниями:

- при исследовании многослойных наноструктур важно то, как располагаются зонды на образцах и как ориентирован ток относительно слоев системы («перпендикулярно» слоям или «вдоль» слоёв). В автореферате про это ничего не сказано;

- многослойность систем $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ и $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ однозначно подтверждается результатами высокоразрешающей ПЭМ. Следовало проделать такое же исследование и для третьей многослойной системы $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$.

2. **Алиханов Нариман Магомед-Расулович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры физики конденсированного состояния и наносистем ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» без замечаний.

3. **Сидоркин Александр Степанович**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры общей физики физического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», со следующими замечаниями:

- при описании пленок чистого магния, напыленных на вращающиеся подложки говорить: «предполагается, что слои чистого магния оказываются разделены слоями чистого магния», но на рентгеновской дифракции пленок Mg следов образования оксида магния не обнаружено;

- при описании многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ говорится о том, что «несмотря на значительные фазовые изменения, происходящие при нагреве образцов, их многослойность сохраняется», но доказательств этому не приведено.

4. Матвеев Николай Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры общей и прикладной физики машиностроительного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», со следующими замечаниями:

- на стр.9 автореферата утверждается «Сформировавшиеся магниевые слои являются текстурированными, причём текстура не зависит от типа подложки», но доказательств этому не приведено;

- зависимость сопротивления от толщины бислоя многослойной наноструктуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ (рис.18) разделены на три характерные области, но в тексте автореферата об этом ничего не сказано.

5. Игнатенко Николай Михайлович, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей физики и прикладной физики (кафедра НМОиПФ) ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), со следующими замечаниями:

- не дана информация о скорости отогрева образца при исследовании температурного поведения электросопротивления материалов, хотя, как известно, скорость нагрева играет для этого важную роль;

- не указан метод измерения $R(T)$, используемые при этом контактные материалы.

На замечания диссертант дал исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и работники ведущей организации являются компетентными специалистами в области физики конденсированного состояния, в частности, в области физических свойств наноструктур, а также имеют ряд публикаций в соответствующей сфере исследования.

Диссертационный совет отмечает, что выполненные соискателем исследования вносят заметный вклад в изучение структуры, термостойкости, электриче-

ских свойств многослойных наноструктур в зависимости от химической активности металлических слоев, как в исходном состоянии, так и после термического отжига.

Оригинальность работы обусловлена уникальностью исследованных объектов – многослойных наноструктур с толщиной слоев, не превышающей нескольких нанометров. В связи с этим полученные в диссертации результаты и закономерности обладают научной новизной.

Показано, что температурные зависимости электрического сопротивления многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$, $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ со сплошными металлическими слоями, исследованные в интервале 300-1000 К, характеризуются общей закономерностью (резкое возрастание электросопротивления), но физические причины этого роста различны:

- в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ рост электросопротивления связан с протеканием металлотермической реакции: окисление магниевых слоев за счет восстановления ниобия из его оксида и образования высокорезистивного состояния из слоев оксида магния и ниобиевых кластеров;

- в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ рост электрического сопротивления связан с окислением магниевых слоев без разрушения оксида циркония, а высокорезистивное состояние в образцах обусловлено наличием двух диэлектрических фаз (оксида магния и оксида циркония);

- в многослойных наноструктурах $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ окисления металлических слоёв не происходит, а резкий рост электрического сопротивления связан с разрушением двумерных слоёв никеля в результате рекристаллизации.

Предложены объяснения:

- наличия электрического порога перколяции в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ обусловленного морфологическим переходом металлических слоев от дискретных к сплошным;

- увеличения плотности электронных состояний на уровне Ферми в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщинами бислоев более 4,6 нм после тер-

мического отжига при температуре 873 К, связанного с увеличением концентрации структурных дефектов в фазе диоксида циркония;

- возникновения анизотропного магниторезистивного эффекта в многослойных наноструктурах $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщинами бислоев от 2,9 до 4 нм в результате отжига при температуре 823 К.

Новые понятия, измененные трактовки старых понятий, новые термины **не вводились**;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что температурная зависимость электрического сопротивления многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ в области низких температур обусловлена прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям, расположенным вблизи уровня Ферми;

обнаружено, увеличение плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми, которые принимают участие в электропереносе через диоксид циркония, обусловленное образованием кислородных вакансий в фазе ZrO_2 при термическом отжиге многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$;

установлены механизмы, приводящие к существенному возрастанию электросопротивления многослойных структур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ на несколько порядков при увеличении температуры;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплексный подход, совмещающий методы рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной и растровой микроскопии, а также измерение электрических характеристик для аттестации многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

получен патент Российской Федерации на полезную модель № 217 845 «Твердотельный аккумулятор водорода»;

предложен способ стабилизации кубической высокотемпературной модификации диоксида циркония при комнатных температурах без введения в него стаби-

лизирующих примесей;

определены режимы напыления многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщинами металлических и диэлектрических слоев, находящимися в диапазоне значений нескольких нанометров;

показана практическая возможность получения многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с дискретными металлическими слоями, сформированными из неокисленных магниевых наночастиц;

установлены критические толщины металлических слоев в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$, при которых слои остаются дискретными и сформированы из наноразмерных металлических частиц;

установлены предельные температуры существования слоистого распределения фаз в исследованных многослойных наноструктурах (723 К для $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, 673 К для $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и 723 К для $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты экспериментальных исследований получены на современном сертифицированном и поверенном оборудовании с использованием стандартизированных методик проведения измерений; показана хорошая воспроизводимость результатов;

теории, используемые для объяснения результатов экспериментов, описания механизмов электропроводности доперколяционных многослойных пленок, изменения структуры и морфологии полученных наносистем в зависимости от толщины бислоя, как в исходном состоянии, так и после термического отжига, адекватны исследованным в работе многослойным наноструктурам металл/оксид;

использовано сопоставление результатов, экспериментально полученных автором, и данных, представленных в научной литературе по теме диссертации;

установлено качественное соответствие экспериментальных данных, полученных в диссертации, с результатами, представленными в научных публикациях по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в анализе литературных источников по теме исследования, участии в синтезе образцов, в анализе, систематизации и об-

суждении результатов экспериментальных исследований, подготовке статей к публикации. Экспериментальные данные, касающиеся исследования структуры, термостойкости и электрических свойств многослойных наноструктур, обсуждаемых в диссертации, получены автором лично.

В ходе защиты диссертации было высказано следующее критическое замечание: в работе, при описании исследуемых многослойных структур, в качестве характеристического параметра исследуемых образцов следовало указывать не толщину бислоя (т.е. металла и оксида), а толщину металлического слоя.

Соискатель Смирнов Андрей Николаевич согласился с замечанием и заверил, что учтёт его в ходе дальнейшей работы.

На заседании 01.04.2025 г. диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для дальнейшего развития физических представлений о закономерностях формирования многослойных наноструктур на основе магния и оксидов переходных металлов (ниобия и циркония), а также определение влияния морфологии и толщины металлических слоев на термическую устойчивость и транспортные свойства полученных наноструктур, принял решение присудить Смирнову Андрею Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 13, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета

1 апреля 2025 года



Белоногов
Евгений Константинович

Калинин
Юрий Егорович