

На правах рукописи



СМИРНОВ Андрей Николаевич

**СТРУКТУРА, ТЕРМОСТОЙКОСТЬ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР
(Mg/NbO_n)₈₂, (Mg/ZrO₂)₅₂, (Ni/ZrO₂)₇₂.**

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель

Стогней Олег Владимирович,
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры твердотельной электроники ВГТУ

Официальные оппоненты:

Юраков Юрий Алексеевич,
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник,
профессор кафедры физики твердого тела
и наноструктур ФГБОУ ВО Воронежского
государственного университета

Комогорцев Сергей Викторович,
д.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник
лаборатории физики магнитных пленок
института физики им. Л. В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет «НИУ «БелГУ»

Защита состоится «1» апреля 2025 г. в 16⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп. 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан «17» февраля 2025 г.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета



Калинин Юрий Егорович.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Магний является одним из основных элементов, используемых при разработке материалов для хранения водорода в виде твердотельных гидридов. Магний имеет низкий атомный вес, что позволяет обеспечивать высокую массовую долю адсорбированного водорода (до 7,6 мас. %). Несмотря на высокую химическую активность для образования гидрида магния необходима высокая температура (573 – 423 К), однако, даже при таких условиях процессы поглощения и выделения водорода протекают медленно. Увеличить скорость сорбции/десорбции водорода можно двумя путями: уменьшением размера магниевых частиц (увеличение химической активности) и использованием катализатора (в частности, оксида ниобия, чья эффективность в качестве катализатора хорошо изучена). Сочетание двух этих подходов могло бы быть реализовано в нанокompозитах Mg-NbO_n, однако, получение таких материалов традиционными методами напыления приводит к полному окислению фазы магния. Альтернативой композитам являются многослойные наноструктуры Mg/NbO_n, в которых слои каждой фазы формируются независимо друг от друга. Такие наноструктуры были получены, однако толщина магниевых слоёв превышала 50-70 нм, что не является оптимальным с точки зрения увеличения скорости химических реакций. Очевидно, что необходимо исследовать возможность получения многослойной структуры с более тонкими слоями магния, в пределе - с дискретными слоями, образованными из наноразмерных гранул, распределённых слоями в диэлектрической матрице. Также важным аспектом является определение критериев выбора металлической и оксидной фаз для формирования многослойной наноструктуры, в которой не происходило бы окисления металлической фазы в исходном состоянии.

Несмотря на плюсы многослойных наноструктур серьёзной проблемой является их невысокая термическая устойчивость. Наноразмерность слоёв или фазовых включений приводит к повышению химической активности материалов вследствие чего даже незначительный нагрев, который необходим для процессов гидрирования, может инициировать межфазное (межслоевое) взаимодействие, что приводит к разрушению слоистости структуры. Поскольку термическая устойчивость многослойной наноструктуры во многом зависит от химической активности фаз, образующих такую структуру, актуальной задачей является изучение влияния степени химической активности формирующих материалов на свойства и термостойкость наноструктур.

Степень проработанности темы

Многослойные наносистемы на основе магния изучаются довольно продолжительное время, однако подавляющая часть работ направлена на изучение структуры и свойств многослойных наносистем со сравнительно большими толщинами слоёв магния (~ 50 – 100 нм). При этом практически полностью остаются невыясненными особенности формирования и свойства многослойных структур с

толщинами магния менее 10 нм, а также вопросы влияния морфологии на электрические свойства и термическую стабильность таких наноструктур.

Цель работы: установить закономерности формирования многослойных наноструктур на основе магния и оксидов переходных металлов (ниобия и циркония) с толщинами бислоев не превышающих 10 нм, а также определить влияние морфологии и толщины металлических слоёв на термическую устойчивость и транспортные свойства полученных наноструктур.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие

задачи:

- исследовать закономерности формирования чистых фаз (Mg , Nb_2O_5 и ZrO_2), при их напылении в циклическом (нанесение на движущиеся подложки) режиме;
- получить многослойные наноструктуры (Mg/NbO_n)₈₂, (Mg/ZrO_2)₅₂ и (Ni/ZrO_2)₇₂ с толщинами бислоев не более 10 нм и определить влияние толщины металлических слоёв на морфологию и механизмы электропереноса в полученных объектах;
- установить границы термической устойчивости многослойных наноструктур в зависимости от типа оксидной фазы (стабильная, нестабильная) и толщины металлических слоёв;
- установить влияние химической активности металлической фазы на электрические свойства многослойной наноструктуры металл/оксид, проведя исследования образцов (Mg/ZrO_2)₅₂ и (Ni/ZrO_2)₇₂;
- установить закономерности влияния термического отжига на структуру и электрические свойства многослойных наноструктур с различной химической активностью металлической (Mg , Ni) и диэлектрической (Nb-O , Zr-O) фаз.

Научная новизна работы

1. Установлен эффект стабилизации высокотемпературной кубической модификации ZrO_2 кислородными вакансиями, формирующимися в процессе напыления беспримесного диоксида циркония.

2. Ионно-лучевым распылением двух независимых мишеней на вращающуюся подложку получены многослойные наноструктуры (Mg/NbO_n)₈₂, (Mg/ZrO_2)₅₂ и (Ni/ZrO_2)₇₂ с градиентом толщины металлических (Mg или Ni) слоёв. Значения толщины одного бислоя в образцах (металл + оксид) варьируется от 0,95 до 8,5 нм. Установлено, что последовательное увеличение толщины металлических слоёв (Mg или Ni) в многослойных наноструктурах (Mg/NbO_n)₈₂, (Mg/ZrO_2)₅₂ и (Ni/ZrO_2)₇₂ сопровождается переходом от дискретных наночастиц металлической фазы к сплошным проводящим слоям.

3. Установлено, что температурная зависимость электрического сопротивления дискретных многослойных наноструктур (Mg/ZrO_2)₅₂ и (Ni/ZrO_2)₇₂ в области низких температур описывается прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Для исследованных многослойных наноструктур сделана оценка плотности электронных

состояний на уровне Ферми и её изменение при увеличении толщины бислоя.

4. Обнаружено увеличение плотности электронных состояний на уровне Ферми, принимающих участие в электропереносе через ZrO_2 , происходящее в результате термического отжига многослойной наноструктуры $(Mg/ZrO_2)_{52}$. Предполагается, что это происходит за счёт образования кислородных вакансий в слоях диоксида циркония вследствие окисления магния.

5. Установлено, что высокотемпературные зависимости электрического сопротивления многослойных наноструктур $(Mg/NbO_n)_{82}$, $(Mg/ZrO_2)_{52}$ и $(Ni/ZrO_2)_{72}$ со сплошными слоями металлической фазы характеризуются общей закономерностью, заключающейся в наличии резкого возрастания электросопротивления образцов на несколько порядков при увеличении температуры. Показано, что физические механизмы роста электрического сопротивления в исследованных структурах различны и определяются элементарным составом многослойной структуры.

Практическая значимость

1. Определен способ стабилизации кубической высокотемпературной модификации диоксида циркония при комнатных температурах без введения в него стабилизирующей примеси.

2. Определены режимы напыления многослойных наноструктур $(Mg/NbO_n)_{82}$, $(Mg/ZrO_2)_{52}$ и $(Ni/ZrO_2)_{72}$ с толщинами металлической и оксидной фаз, находящимися в диапазоне значений нескольких нанометров.

3. Показана практическая возможность получения многослойных наноструктур Mg/ZrO_2 с дискретными металлическими слоями, сформированными из неокисленных наноразмерных частиц Mg.

4. Установлены толщины металлических слоёв в многослойных наноструктурах $(Mg/ZrO_2)_{52}$ и $(Ni/ZrO_2)_{72}$ при которых слои являются дискретными и сформированы из наноразмерных металлических частиц.

5. Установлено, что слоистое расположение материала в исследованных многослойных наноструктурах сохраняется до сравнительно высоких температур: 723 К для $(Mg/NbO_n)_{82}$, 673 К для $(Mg/ZrO_2)_{52}$ и 723 К для $(Ni/ZrO_2)_{72}$.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Стабилизация высокотемпературной (кубической) модификации диоксида циркония за счет возникновения кислородных вакансий в пленке, формирующейся в условиях дефицита кислорода при ионно-лучевом распылении беспримесного ZrO_2 в атмосфере аргона.

2. Резкий рост электрического сопротивления более чем на два порядка при нагреве многослойных наноструктур $(Mg/NbO_n)_{82}$ с толщиной бислоя превышающей 4 нм обусловлен протеканием металлотермической реакции: окисление слоев магния за счет разложения оксида ниобия и образования наночастиц чистого ниобия.

3. Нагрев многослойной наноструктуры $(Mg/ZrO_2)_{52}$ приводит к окислению

фазы магния за счёт кислорода, содержащегося в слоях диоксида циркония. Следствием этого является увеличение плотности электронных состояний на уровне Ферми в диэлектрических слоях, происходящее в результате отжига.

4. В многослойных наноструктурах $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ при увеличении толщины никелевых слоёв наблюдается электрический порог перколяции, связанный с морфологическим переходом слоёв от дискретной структуры к сплошной. Многослойные наноструктуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с дискретными никелевыми слоями проявляют туннельное магнитосопротивление.

5. Резкое уменьшение электросопротивления многослойных наноструктур $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ в интервале температур 700 - 800 К связано с коалесценцией никелевых наногранул и образованием проводящих слоёв. Следствием этого является появление анизотропного магнитосопротивления, отсутствующего в образцах в исходном состоянии.

6. Рост электрического сопротивления многослойных наноструктур $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ при температурах, превышающих 850 К, связан с процессами рекристаллизации и разрушением сплошности проводящих слоёв.

Достоверность

Достоверность полученных результатов исследований определяется применением современных высокотехнологичных и научно обоснованных методов измерения, использованием современного исследовательского оборудования, использованием компьютерных систем для анализа и обработки полученных результатов исследования.

Апробация работы

Основные результаты научно-квалификационной работы были доложены и обсужданы на следующих конференциях и семинарах: VII Международной молодежной научной школе – конференции «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 2018), VIII Международной молодежной научной школе – конференции «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 2019), II международной научно – практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (Воронеж, 2020.), VII международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2020» (Екатеринбург, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (Воронеж, 2018), VIII международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021», (Екатеринбург, 2021), IX международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2022», (Екатеринбург, 2022), Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (Курск, 2017), XXIV международной конференции «Релаксационные явления в твердых телах» (Воронеж, 2019), XXV международной конференции «Релаксационные явления в твердых телах» (Воронеж, 2022), 59-62 Отчётной на-

учно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ (Воронеж, 2019-2022).

Личный вклад автора

Автором выполнены все измерения электрических свойств как чистых компонент (Mg, NbO, ZrO), так и многослойных наноструктур (Mg/NbO_n)₈₂, (Mg/ZrO₂)₅₂ и (Ni/ZrO₂)₇₂ при различных температурах в исходном состоянии и после отжига. Исследованы закономерности структурных изменений чистых компонент и многослойных наноструктур после термического отжига. Проведена обработка и анализ полученных результатов. Автор участвовал в обсуждении результатов экспериментов и проводил подготовку научных публикаций для печати

Связь работы с научными программами и проектами

В основу диссертации положены результаты исследований по следующим научно-исследовательским программам и проектам:

- проект «Нелинейные явления в функциональных и конструкционных гетероструктурах на основе оксидных систем» в рамках базовой части государственного задания (проект №FZGM-2020-0007, 2020-2022 гг.).

- проект «Твердофазные гетерогенные среды конструкционного и функционального назначения» в рамках базовой части государственного задания (проект №FZGM-2023-0006, 2023-2025 гг.)

- проект «Разработка водородопоглощающей ленты на основе многослойных наноструктур» (программа «УМНИК», договор № 16312ГУ/2021).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 22 печатных работы, из них 7 - в изданиях, входящих в перечень ВАК (4 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus), 1 патент.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 112 наименований. Основная часть работы изложена на 155 страницах, содержит 97 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, приведены положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, приводятся сведения об апробации работы, количестве публикаций, структуре и объеме диссертации.

В первой главе выполнен обзор литературных данных по теме диссертации. Представлены краткие сведения о многослойных наноструктурах и их свойствах, а так же кратко проведён обзор основных особенностей магния и тонкоп-

лочных многослойных структур на его основе. Приведены данные о структуре и свойствах многослойных наноструктур Mg/NbO с толщинами бислоев от 50 до 70 нм.

Во второй главе описаны способ получения, методы аттестации образцов и экспериментальные методы исследования структуры и электрических свойств многослойных образцов при различных температурах.

Многослойные наноструктуры $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ были получены методом ионно-лучевого распыления двух пространственно-разнесённых мишеней (металлической и оксидной) с последующим осаждением материала на подложки, совершающие круговые движения вокруг мишеней. Численные индексы в написании формулы обозначают количество оборотов подложкодержателя вокруг мишеней, то есть число бислоев (слой металла + слой оксида). Напыление структур осуществлялось на подложки трех типов: покрывное стекло, монокристаллический кремний и ситалл.

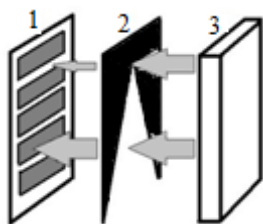


Рис.1. Схема распыления металлической мишени через V-образный экран: где 1 – подложкодержатель с ситалловыми подложками, 2 – V-образный экран, 3 – металлическая мишень.

Осаждение металлической фазы (Mg или Ni) производилось через V-образный экран, разделяющий мишень и подложкодержатель (рис. 1), осаждение оксидов (NbO_n или ZrO_2) производилось непосредственно на подложки без использования экрана. Применение экрана позволило получать многослойные структуры с разной толщиной металлических слоев (напыляемых через V-образный экран), но одинаковой толщиной слоёв оксида (напыляемого на подложки без экрана). Подложки размещались на поверхности подложкодержателя (рис. 1) и в зависимости от положения подложки плотность атомного потока, проходящего через V-образный экран, была различной, вследствие чего толщина осаждаемого материала была разной. В верхней части подложкодержателя толщина металлической пленки была минимальной, в нижней – максимальной. В среднем общая толщина многослойных наноструктур, полученных по данной технологии, варьируется в интервале 100 – 500 нм, в зависимости от положения подложки на подложкодержателе.

Измерение общей толщины полученных многослойных структур проводилось с помощью растровой электронной микроскопии скола образца (Tescan Mira 3) и с помощью интерферометра МИИ-4. Определение толщины одного бислоя осуществлялось на основе просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) поперечного среза образца (Hitachi HT7700) и данных малоугловой рентгеновской рефлектометрии (Bruker D2 Phaser). Исследование морфологии и фазового состава многослойных наноструктур в исходном состоянии и после термообработки проводилось на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser в $\text{Cu K}\alpha$ излучении.

Электрическое сопротивление образцов измерялось с помощью двухзондо-

вого потенциометрического метода. Измерение температурных зависимостей сопротивления при нагреве проводилось в вакуумной камере с остаточным давлением $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ Па. Температурные зависимости сопротивления в интервале 77 – 300 К измерялись с использованием проточного криостата. Магниторезистивный эффект исследовался двухзондовым потенциометрическим методом при помещении образца в поле электромагнита и изменении напряжённости магнитного поля в интервале $0 - \pm 8$ кЭ. Термические отжиги многослойных образцов также проводились в вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ Па.

Третья глава посвящена изучению структуры и свойств тонких пленок, сформированных из чистых фаз (Mg , NbO_n и ZrO_2), полученных в результате ионно-лучевого распыления однофазных мишеней. Осаждение материала осуществлялось на вращающиеся подложки, то есть происходило циклично (осаждение – пауза), так, как это происходит при напылении многослойной структуры.

Оксид ниобия. По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что при напылении оксида ниобия формируется гомогенная пленка с аморфной структурой.

Магний. Использование V-образного экрана, размещенного между мишенью и подложкодержателем, позволило сформировать чистые магниевые пленки с различной толщиной. Анализ малоугловой рентгеновской рефлектометрии полученных пленок, показал, что напыление пленки магния в режиме, при котором длительность циклов осаждения материала меньше, чем период нахождения полученного слоя в разряженном аргоне ($P \sim 10^{-4}$ Па) без конденсации материала, приводит к формированию слоистой структуры (рис. 2). Предполагается, что слои чистого магния оказываются разделенными слоями оксида магния, которые формируются за тот промежуток времени, когда подложки находятся вне потока конденсирующихся атомов. Сформировавшиеся магниевые слои являются текстурированными (рис. 3), причём текстура не зависит от типа подложки (аморфное стекло или монокристаллический кремний).

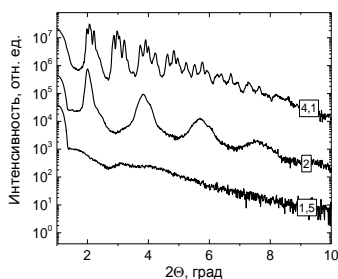


Рис. 2 – Малоугловая рентгеновская рефлектометрия тонких пленок Mg, нанесенных на вращающиеся подложки с различной толщиной бисюля (в нм).

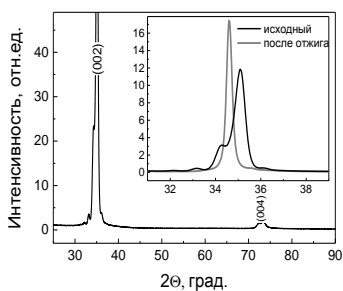


Рис. 3 - Рентгеновская дифракция пленки Mg, нанесенной на вращающуюся подложку. На вставке приведен пик (200) в исходном состоянии и после отжига при 723 К

Наличие спутников у пика (002) так же является подтверждением многослойности полученной магниевой пленки. После термического отжига, проведенного в вакууме при температуре 723 К, большая часть спутниковых пиков исчезло (см. вставку, рис. 3), что объясняется перераспределением атомов кислорода и разрушением слоистости структуры.

Оксид циркония. Установлено, что при напылении нестабилизированного диоксида циркония в среде чистого аргона происходит формирование орторомбической модификации диоксида циркония, которая является неравновесной для всего температурного интервала существования оксида (рис. 4). Предполагалось, что орторомбическая модификация стабилизируется кислородными вакансиями,

которые в большом количестве формируются при напылении пленки в среде аргона. Для проверки данного предположения проводились отжижки полученного диоксида в разных условиях. Отжиг в вакууме $P \sim 10^{-4}$ Па должен был слабо влиять на концентрацию вакансий, в то время как отжиг в воздушной среде должен был способствовать заполнению вакансий кислородом. Отжижки проводились при температурах 873, 1023 и 1273 К. Помимо этого, были проведены отжижки с помощью импульсной фотонной обработки

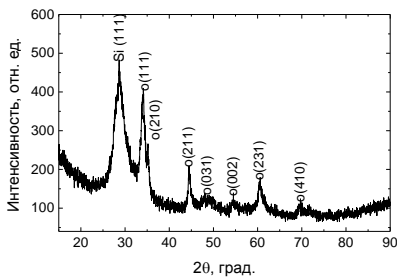


Рис. 4 - Рентгеновская дифрактограмма ZrO_2 , нанесенного на кремниевую подложку.

(ИФО), которая осуществляла нагрев образцов в течении 1 сек. Во всех случаях термический отжиг приводит к распаду орторомбической модификации диоксида и формированию высокотемпературной кубической фазы или равновесной моноклинной фазы. При этом среда, в которой проведены отжижки, влияет на формирующуюся структуру.

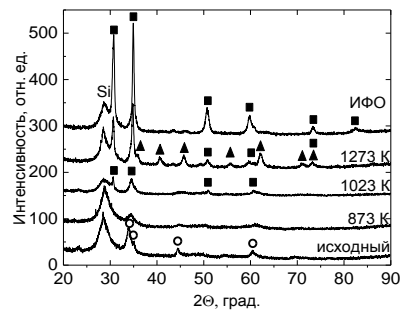


Рис. 5 - Дифрактограммы покрытий нестабилизированного ZrO_2 , напыленного на кремниевую подложку и отожженных в вакууме при разной температуре: ■ - кубическая фаза, ○ - орторомбическая фаза; ▲ - моноклинная фаза.

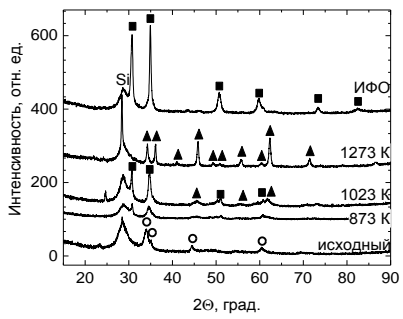


Рис. 6 - Дифрактограммы покрытий нестабилизированного ZrO_2 , напыленного на кремниевую подложку отожженных на воздухе при разной температуре: ■ - кубическая фаза, ○ - орторомбическая фаза; ▲ - моноклинная фаза.

Термический отжиг, проводимый в вакууме (рис. 5) приводит к преимущественному образованию кубической модификации диоксида, в то время как отжиги в воздушной среде приводят к образованию равновесной моноклинной структуры (рис. 6). Таким образом, вакуумный отжиг позволяет стабилизировать высокотемпературную кубическую модификацию диоксида за счёт сохранения кислородных вакансий. Отжиг в воздушной среде, напротив, приводит к формированию равновесной моноклинной модификации, поскольку кислородные вакансии заполняются кислородом. Характерно, что ИФО независимо от среды стабилизирует только кубическую модификацию. По всей видимости, это связано с кратковременностью теплового воздействия ИФО (1-2 сек.) в течение которого атомы кислорода не успевают диффундировать в объём структуры, чтобы заполнить имеющиеся вакансии.

В четвертой главе обсуждаются результаты исследования многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ в которой толщина бислоев $(\text{Mg}+\text{NbO})$ меняется от 2,2 до 6,2 нм. Многослойность полученных образцов подтверждается результатами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, а так же данными ПЭМ бокового среза образцов с максимальной толщиной магниевых слоев (рис. 7). Несмотря на то, что слои магния и оксида ниобия наносились независимо друг от друга, наблюдается частичное окисление магния (рис. 8). Очевидно, что окисление магния происходит на интерфейсе, разделяющим разнородные слои.

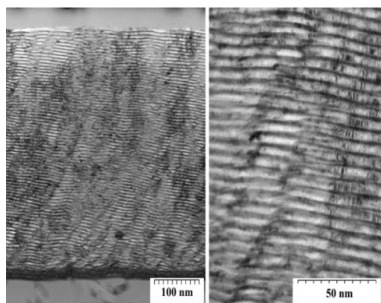


Рис. 7 - ПЭМ изображения многослойной пленки $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ с максимальной толщиной бислоя ~ 5 нм.

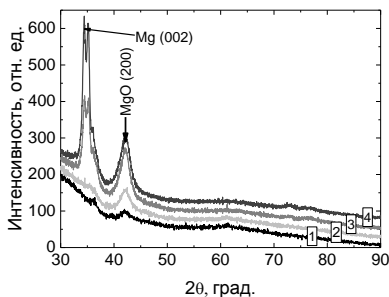


Рис. 8 - Общая рентгеновская дифракция многослойных пленок $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ с различными толщинами бислоя: 1 – 2,9 нм, 2 – 3,1 нм, 3 – 4,5 нм, 4 – 5 нм.

Зависимость электрического сопротивления многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ от толщины бислоя аналогична концентрационной зависимости сопротивления в композитах металл-диэлектрик (рис. 9). Это позволяет предполагать наличие электрического порога перколяции, связанного с изменением морфологии слоёв магния при увеличении их номинальной толщины. Перколяция обусловлена переходом от дискретных магниевых слоёв к сплошным. Наличие дискретных и сплошных магниевых слоев подтверждается температурными зависимостями сопротивления образцов с разной толщиной слоёв, измеренными в интервале температур 77 – 300 К.

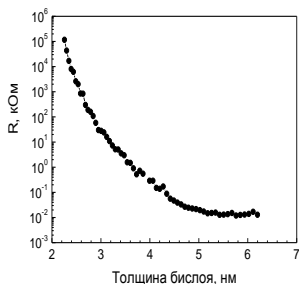


Рис. 9 - Зависимость электрического сопротивления многослойной системы $(Mg/NbO_n)_{82}$ от толщины бислоя.

родом, выделяемым при восстановлении оксида ниобия (рис. 11).

Высокое значение сопротивления структур после отжига свидетельствует о том, что образовавшийся металлический ниобий имеет вид отдельных нанокластеров, не объединенных в перколированную структуру, а слои магния окислены до такой степени, что также не являются проводящими каналами.

Несмотря на значительные фазовые изменения, происходящие при нагреве образцов, их многослойность при этом сохраняется. Разрушение многослойной структуры наблюдается после отжига при 873 К, однако и в этом случае формируется не гомогенная структура, а скорее композитная.

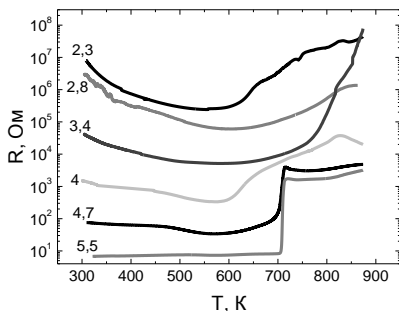


Рис. 10 - Температурные зависимости сопротивления многослойной структуры $(Mg/NbO_n)_{82}$ с различной толщиной бислоя (нм).

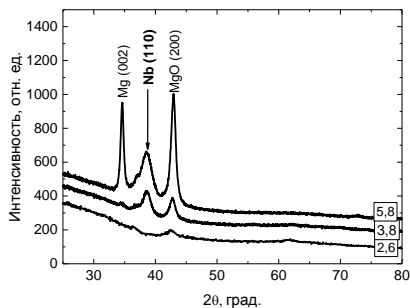


Рис. 11 - Диффрактограммы многослойной структуры $(Mg/NbO_n)_{82}$ с различной толщиной бислоя (нм), отожженной при температуре 723 К.

Пятая глава посвящена обсуждению результатов исследования многослойной наноструктуры $(Mg/ZrO_2)_{52}$. Использование более стабильного (по сравнению с оксидом ниобия) оксида циркония позволило сформировать многослойную структуру, в которой окисления слоев магния не происходит. Многослойность образцов подтверждается результатами малоугловой рентгеновской рефлектомет-

рии и данными ПЭМ (рис. 13). Определение интервала значений толщины бислоя в полученных образцах проводилось на основе интерферометрии, растровой электронной микроскопии и ПЭМ. В соответствии с полученными результатами толщина бислоя в образцах меняется от 3,5 нм до 8,5 нм.

Зависимость электрического сопротивления от толщины бислоя многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ (рис. 14) подобна соответствующей зависимости для системы $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ (см. рис. 9). Уменьшение сопротивления многослойных образцов при увеличении толщины бислоя составляет 9 порядков, что свидетельствует о наличии электрического порога перколяции. Исследование механизмов электропереноса в многослойных образцах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ подтверждает, что вплоть до толщины бислоя 7.2 нм проводимость в наноструктурах неметаллическая. Таким образом, с одной стороны, уменьшение электрического сопротивления происходит за счет увеличения толщины магниевых слоев и формирования больших кластеров, которые, с другой стороны, остаются электрически несвязанными друг с другом, что определяет неметаллический характер проводимости образцов.

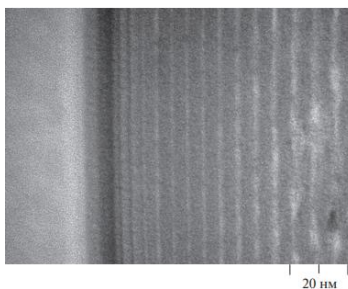


Рис. 13 - ПЭМ изображение образца многослойной структуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с максимальной толщиной слоёв магния

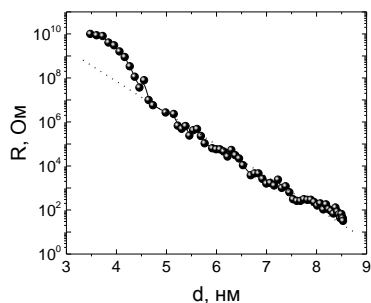


Рис. 14 - Зависимость электросопротивления многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ от толщины бислоя.

Температурная зависимость сопротивления пленок $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ приведена на рис. 15. В данном случае принципиальной разницы между зависимостями сопротивления для многослойных наноструктур с дискретными и сплошными слоями магния не наблюдается. Небольшой локальный минимум сопротивления в области 420 - 480 К обусловлен процессами рекристаллизации магния, приводящими к формированию кластеров в дискретных слоях или к укрупнению зёрен в сплошных слоях. При температурах, превышающих 523 – 600 К наблюдается монотонный рост электросопротивления. Увеличение электросопротивления объясняется образованием оксида магния. Это подтверждается дифракционными исследованиями образцов с разной толщиной бислоя, отожжённых при различных температурах. В качестве примера на рис. 16 приведены результаты для многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщиной бислоя 8 нм.

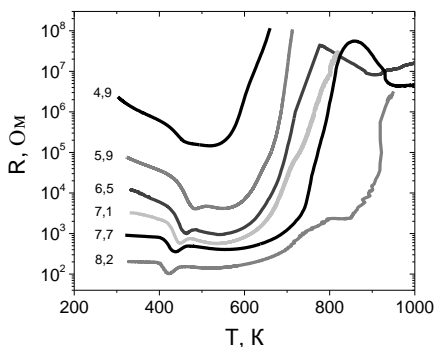


Рис. 15 - Температурные зависимости сопротивления многослойных структур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с различной толщиной бислоя (в нм).

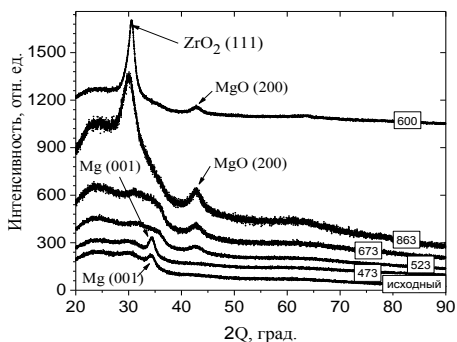


Рис. 16 - Общая дифракция образца многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщиной бислоя 8 нм при разной температуре отжига.

Установлено, что при нагреве образцов до 473 К слои магния не окисляются: на дифрактограммах присутствует только пик от магния, как и в исходном состоянии. Нагрев до более высоких температур (523 К) приводит к окислению магния (рис. 16). Таким образом, рост сопротивления при нагреве многослойных структур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ обусловлен окислением магниевых слоёв. Выход сопротивления на некоторое максимальное значение, связан, по всей видимости, с полным окислением магниевых слоев. Характерно, что с увеличением толщины бислоя, температура, при которой начинается резкий рост сопротивления, возрастает, следовательно, можно предположить, что при этой температуре сплошные проводящие слои магния разрываются оксидными областями. Чем толще магниевый слой, тем более высокая температура требуется для формирования оксида на всю глубину слоя.

Несмотря на окисление магниевых слоев, приводящее к изменению фазового состава образцов, многослойность структуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ при этом сохраняется. Толщина магниевых слоёв сказывается на значении предельной температуры, которую многослойная структура может выдержать без разрушения. Увеличение толщины бислоя приводит к снижению термостойкости многослойной структуры. Сохранение слоистой структуры после отжигов подтверждается данными ПЭМ.

Окисление магния в наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ наблюдается после отжигов, проводимых в вакууме, поэтому предполагалось, что кислород, необходимый для этого процесса, поступает из диоксида циркония. Для проверки этого предположения проведены исследования плотности электронных состояний на уровне Ферми ($g(E_F)$) в диоксиде циркония в исходном состоянии и после отжига при 873 К. Данный параметр определялся на основе анализа температурных зависимостей электросопротивления образцов, измеренных в интервале 77 – 300 К. Зависимость $g(E_F)$ от толщины бислоя в многослойной наноструктуре $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ приведена на рис. 17.

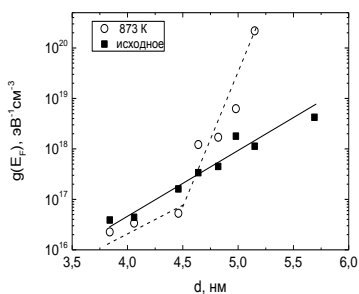


Рис. 17 - Зависимость плотности электронных состояний на уровне Ферми многослойной системы $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ в исходном состоянии и после отжига при 873 К.

Иными словами, наблюдается резкое увеличение плотности дефектов в диэлектрической фазе, то есть в диоксиде циркония. Основной тип структурных дефектов в напыленном вакуумными методами диоксиде циркония это кислородные вакансии. Следовательно, наблюдаемый в эксперименте рост величины $g(E_F)$ после отжига образцов $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ свидетельствует о возрастании концентрации вакансий. То есть происходит разрыв связей Zr-O и высвобождающийся кислород окисляет магний, что, в свою очередь, увеличивает сопротивление многослойной наноструктуры, так как вместо металлической фазы формируется оксидная.

В шестой главе представлены результаты исследования многослойной наноструктуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$. В этой системе металлические слои сформированы не из химически активного магния, а из никеля, который существенно менее активен. На основе анализа данных малоугловой рефлектометрии установлено, что толщина бислоя в этой системе меняется от 2 нм до 8,3 нм. В отличие от многослойных наноструктур с магнием в системе $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ зависимость электросопротивления от толщины бислоя характеризуется наличием ярко выраженного порога перколяции (рис. 18). Очевидно, что при послойном нанесении оксида циркония и никеля окисления никелевой фазы не происходит, в отличие от магния, поэтому электрическая перколяция наступает сразу при физическом контактировании никелевых кластеров друг с другом. Никель – ферромагнитный металл, поэтому подтверждением дискретности металлических слоёв малой толщины является наличие туннельного магниторезистивного эффекта (рис. 19). Магнитосопротивление проявляется в доперколяционной области и исчезает при толщине бислоя 3,9 нм. Помимо этого изменение морфологии многослойных структур $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ при уве-

Зависимость $g(E_F)$ в исходном состоянии аналогична результатам, получаемым для доперколяционных композитных наноструктур: увеличение $g(E_F)$ при росте концентрации металлической фазы (то есть при увеличении размера гранул). Следовательно, многослойные наноструктуры $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщинами бислоев от 3,5 до 6 нм по электрическим свойствам ведут себя также, как композитные наноструктуры находящиеся до порога электрической перколяции (представляют собой металлические гранулы, расположенные в объеме диэлектрической матрицы). Однако отжиг многослойных наноструктур приводит к совершенно другому результату по сравнению с композитными материалами. В композитных образцах металл-диэлектрик отжики приводят к уменьшению $g(E_F)$, что объясняется уменьшением плотности дефектов в диэлектрической матрице. В многослойных структурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщинами бислоя превышающими 4,6 нм отжиг приводит к увеличению плотности электронных состояний на уровне Ферми.

личении толщины никелевых слоёв подтверждается изменением механизма электропереноса с прыжковой проводимости на металлическую. Для доперколяционных многослойных образцов $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ определены значения $g(E_F)$, которые линейно увеличиваются при увеличении номинальной толщины металлического слоя с 10^{21} до $2 \cdot 10^{22}$ $\text{эВ} \cdot \text{см}^{-3}$, что характерно для изотропных нанокompозитов металл-диэлектрик, расположенных вблизи порога перколяции.

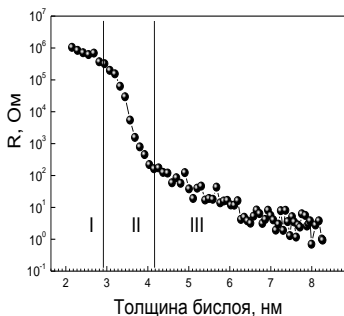


Рис. 18 - Зависимость сопротивления многослойной структуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ от толщины бислоя

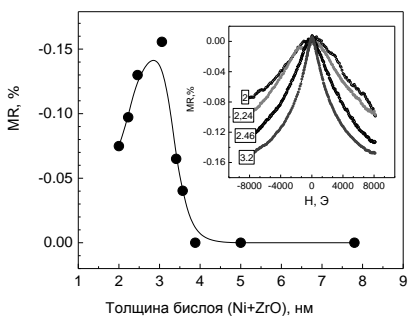


Рис. 19 - Зависимость магнитосопротивления от толщины бислоя в многослойной системе $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$. На вставке приведены полевые зависимости магнитосопротивления

Морфология никелевых слоёв определяет вид температурных зависимостей сопротивления многослойных наноструктур при нагреве. Можно выделить три типа зависимости сопротивления от температуры, которые приведены на рис. 20.

Для образцов с дискретными слоями никеля (толщина бислоя < 3 нм) сопротивление монотонно увеличивается аналогично зависимостям, наблюдаемым в доперколяционных композитах металл-диэлектрик и многослойных структурах с магнием (рис. 10, 15).

В образцах находящихся на пороге перколяции (толщина бислоя 3 - 4 нм) при 713 - 723 К начинается резкое уменьшение сопротивления, что связано с процессами укрупнения никелевых зёрен и образованием сплошных проводящих (перколяционных) кластеров. Формирование проводящих слоев после отжига подтверждается появлением анизотропного магнитосопротивления в образцах с толщиной бислоя 3 - 4 нм, отожжённых при 823 К (на рис. 21 приведён пример такой зависимости). Анизотропное магнитосопротивление заключается в зависимости величины и знака эффекта от взаимной ориентации тока и магнитного поля. Этот эффект характерен для сплошных никелевых плёнок и его появление (рис. 21) подтверждает формирование сплошной никелевой среды после отжига. При дальнейшем увеличении температуры в таких образцах (толщина бислоя 3 - 4 нм) начинается резкий рост электросопротивления на два-три порядка (рис. 20). Однако, это увеличение не связано с процессами окисления никелевых слоёв, как это имело место в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$, где происходило окисление магния (рис. 16). Рентгенодифракционные исследования отожжённых

образцов данной группы показывают, что даже после 30 минутного отжига при температуре 963 К, никаких признаков оксида никеля не наблюдается (рис. 22).

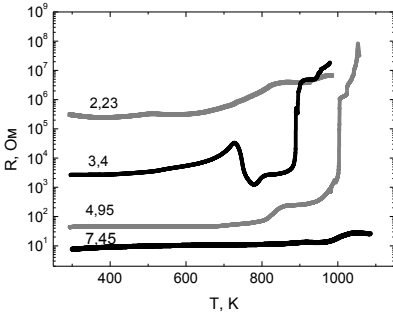


Рис. 20 - Температурные зависимости сопротивления многослойных структур $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с различной толщиной бислоя (нм).

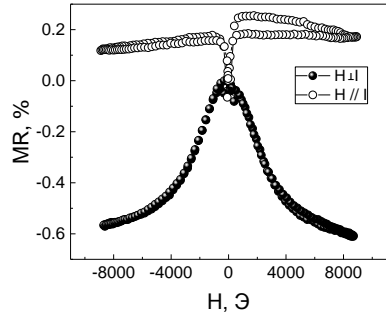


Рис. 21 - Магниторезистивный эффект многослойной наноструктуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщиной бислоя 3,4 нм после отжига при температуре 823 К.

Фазовый состав многослойных образцов $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ не меняется, следовательно, резкий рост сопротивления обусловлен изменением морфологии слоёв, определяющих низкорезистивные свойства многослойных структур – то есть слоёв никеля. Данные малоугловой рентгеновской рефлектометрии (рис. 23) свидетельствуют о том, что после отжига при 923 К начинаются изменения межфазных границ, что отражается в изменении рентгеновских кривых. Предполагается, что эти изменения обусловлены разрушением сплошности тонких двумерных слоёв никеля вследствие процессов рекристаллизации.

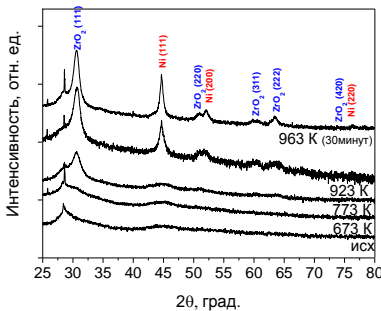


Рис. 22 - Дифрактограммы многослойной структуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщиной бислоя 3,4 нм в исходном состоянии и после отжигов.

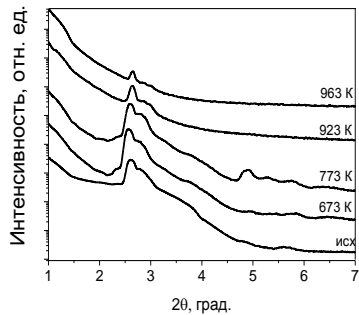


Рис. 23 – Малоугловая рентгеновская рефлектометрия многослойной структуры $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщиной бислоя 3,4 нм в исходном состоянии и после отжигов.

Рекристаллизация тонких двумерных слоёв никеля сопровождается коалесценцией наноразмерных зерен, в результате чего площадь поверхности, на которой располагаются укрупнённые зерна, становится меньше, чем исходная площадь, зани-

маемая наноразмерными зёрнами. Поэтому при рекристаллизации происходит уменьшение суммарной площади, исходно занимаемой зёрнами, что приводит к «разрыву» сплошности двумерной пленки никеля и резкому росту сопротивления. Протекание процесса рекристаллизации после отжига при 923 К подтверждается данными рентгеноструктурного анализа (рис. 22) и увеличением среднего размера зерна фазы никеля с 3,4 нм (отжиг при 773 К) до 20-24 нм (отжиг при 923 К).

Очевидно, что при увеличении толщины никелевых слоёв их разрыва в результате рекристаллизации происходить не должно. Это наблюдается в многослойных структурах $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с толщиной бислоя превышающей 6,58 нм. В образцах с большими толщинами бислоя рекристаллизация не приводит к резкому росту сопротивления во всем исследованном интервале температур (вплоть до 1073 К). На рис. 20 приведён пример температурной зависимости сопротивления для многослойной структуры с толщиной бислоя 7,45 нм.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Установлено, что при ионно-лучевом напылении магния в циклическом режиме (осаждение + пауза) в среде чистого аргона на вращающейся подложке происходит формирование многослойной структуры Mg-MgO вследствие захвата магнием атомов кислорода из остаточного газа распылительной камеры в период паузы.

2. Экспериментально показано, что кислородные вакансии стабилизируют метастабильные модификации диоксида циркония (орторомбическую и кубическую фазы) при комнатной температуре без введения в оксид стабилизирующих примесей

3. Ионно-лучевым распылением двух независимых мишеней с последующим осаждением материала на вращающуюся подложку получены многослойные наносистемы $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с градиентом толщины металлических слоев. Значения толщины одного бислоя в образцах (металл + оксид) варьируется от 0,95 до 8,5 нм. На основе данных рентгеноструктурного анализа установлено, что в напыленных многослойных структурах $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ в исходном состоянии поверхность магниевых слоев частично окислена. Показано, что использование стабильного диоксида циркония в качестве диэлектрических слоёв при формировании многослойных структур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ позволяет получать неокисленные слои (или наночастицы) металлической фазы (Mg или Ni).

4. Установлено, что последовательное увеличение толщины металлических слоёв (Mg или Ni) в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ сопровождается переходом от дискретных слоёв металла к сплошным проводящим слоям. Такой морфологический переход объясняет наличие электрического порога перколяции во всех исследованных системах.

5. В многослойных наноструктурах $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ с дискретными металлическими слоями обнаружено туннельное магнитосопротивление достигающее 0,16 % в поле 8 кЭ.

6. Исследованы температурные зависимости электрического сопротивления синтезированных многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ в интервале температур 77 – 300 К. Установлено, что в дискретных многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ в области низких температур реализуется прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Показано, что в дискретных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ плотность электронных состояний на уровне Ферми линейно увеличивается при увеличении толщины металлического слоя ($4 \cdot 10^{16}$ - $5 \cdot 10^{18}$ эВ·см⁻³ и 10^{21} - $2 \cdot 10^{22}$ эВ·см⁻³, соответственно).

7. Установлено, что температурные зависимости электрического сопротивления многослойных наноструктур $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$, $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$ со сплошными слоями металлической фазы, исследованные в интервале 300 – 1000 К, характеризуются общей закономерностью. Во всех системах наблюдается резкое возрастание электросопротивления образцов на несколько порядков при увеличении температуры. Установлены физические причины резкого роста электрического сопротивления для исследованных систем:

- в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$ рост электросопротивления обусловлен протеканием металлотермической реакции: окисление слоев магния за счет разложения оксида ниобия и образование высокорезистивного состояния из слоев оксида магния и ниобиевых нанокластеров;

- в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ рост электросопротивления также обусловлен окислением магния, однако при этом разложения оксида циркония не происходит, а высокорезистивное состояние в этих образцах обусловлено наличием двух диэлектрических фаз: оксида циркония и оксида магния;

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

8. Увеличение плотности электронных состояний на уровне Ферми в многослойных наноструктурах $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ с толщинами бислоев более 4,6 нм после отжига при температуре 873 К, которое ранее не наблюдалась ни в композитных, ни в многослойных наноструктурах, обуславливается окислением магниевой фазы кислородом из диоксида циркония, что приводит к увеличению концентрации дефектов (кислородных вакансий) в диоксиде.

9. На основе результатов малоугловой рентгеновской рефлектометрии установлено, что слоистая морфология в полученных наноструктурах сохраняются до сравнительно высоких температур: 723 К для $(\text{Mg}/\text{NbO}_n)_{82}$; 673 К для $(\text{Mg}/\text{ZrO}_2)_{52}$ и 723 К для $(\text{Ni}/\text{ZrO}_2)_{72}$.

10. Образование сплошных проводящих слоев за счет коалесценции никелевых гранул 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 приводит к появлению анизотропного магнорезистивного эффекта.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Стогней О.В. Получение многослойных образцов Mg/NbO / О.В. Стогней, А.В.Ситников, **А.Н.Смирнов**, К.И.Семенов, В.В.Черниченко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 18 – 23.
2. Стогней О.В. Термическая стабильность многослойной структуры Mg/NbO / О.В. Стогней, А.В.Ситников, **А.Н.Смирнов**, // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 144 – 150.
3. Stognei O.V. Influence of the nickel layers thickness on the electrical properties of (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.
4. 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.
5. Stognei O. V. Phase Transformations in Pure ZrO₂ / O. V. Stognei, **A.N. Smirnov** // AIP Conference Proceedings. 2022, V. 2466, P. 03005.
6. Стогней О. В. Структура и электрические свойства многослойных наноструктур (Mg/ZrO₂)₅₂ / О. В. Стогней, **А. Н. Смирнов**, А. В. Ситников, М. Н. Волочаев // Известия РАН. Серия Физическая. – 2023. – Т. 82. - №. 9. – С. 1348-1354.
7. Stognei O. Thermal Stability of (Mg/NbO_x)₈₂ Multilayer Nanostructure / O. Stognei, **A. Smirnov**, A. Sitnikov, M. Volochaev // Phys. Status Solidi A – 2024. - 2400244.

Патенты

8. Пат. 217 845 Российская федерация, МПК H01M 10/30, H01M 4/38, B82Y 30/00. Твердотельный аккумулятор водорода / **Смирнов А. Н.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ). - № 2023103553. – заявл. 15.02.2023; опубл. 21.04.2023, Бюл. № 12. – 5 с.

Материалы конференций

9. **Смирнов А. Н.** Влияние термообработки на электроперенос в многослойных наноструктурах (Ni/ZrO₂)₇₂ / А. Н. Смирнов, О. В. Стогней // Материалы XXV Международной конференции «Релаксационные явления в твердых телах». – Воронеж. – 2022. – с. 116-117.
10. **Смирнов А. Н.** Термическая устойчивость многослойных наноструктур (Mg/ZrO₂)₅₂ / Смирнов А. Н., Кириллова В. А., Стогней О. В. // Материалы XXV Международной конференции «Релаксационные явления в твердых телах». - Воронеж. – 2022. – с. 118-119.
11. Непочатая И. А. Структурные особенности и магниторезистивные свойства многослойной наноструктуры Ni/ZrO₂ / И.А. Непочатая, **А.Н. Смирнов**, О.В. Стогней // Научная опора Воронежской области. Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж. - 2021. - С. 310-313.
12. Кириллова В.А. Термическая устойчивость многослойной наноструктуры (Mg/ZrO)₄₅ / Кириллова В.А., **Смирнов А.Н.**, Стогней О.В. // Научная опора Воронежской области. Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж. - 2021. - С. 320-322.

13. Непочатая И.А. Влияние толщины слоев никеля на электрические и магниторезистивные свойства $(\text{Ni/ZrO})_{45}$ многослойных наноструктур / Непочатая И.А., **Смирнов А.Н.**, Стогней О.В. // Микроэлектроника и наноэлектроника: актуальные проблемы. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж. - 2021. - С. 99-103.
14. **Смирнов А. Н.** Фазовые превращения в беспримесном ZrO_2 / А. Н. Смирнов, И. А. Анисимов, О. В. Стогней // Прикладная физика твердого тела. Материалы 61-й отчетной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов. Воронеж. - 2021. - с. 16-17.
15. **Смирнов А. Н.** Фазовые превращения в нестабилизированном ZrO_2 / А. Н. Смирнов, О. В. Стогней / VIII Международная молодежная конференция Физика. Технологии. Инновации. – 2021. - Екатеринбург. – с. 302.
16. Стогней О. В. Многослойные наноструктуры $(\text{Ni/ZrO}_2)_{45}$ с разной толщиной никелевых слоев / Стогней О. В., **Смирнов А. Н.**, Непочатая И. А., Кириллова В. А. // VII Международная молодежная конференция, посвященная 100-летию Уральского федерального университета. – 2020. - Екатеринбург. – с. 330.
17. **Смирнов А. Н.** Температурная стабильность многослойной структуры Mg/ZrO_2 / А.Н. Смирнов, О.В. Стогней // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно- практической конференции. Воронеж. - 2020. - С. 239 - 240.
18. Непочатая И. А. Особенности многослойной наноструктуры Ni/ZrO_2 / И. А. Непочатая, О. В. Стогней, **А. Н. Смирнов** // Прикладная физика твердого тела. Материалы 60-й отчетной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов. Воронеж. - 2020. - с. 29-30.
19. **Смирнов А.Н.** Получение многослойных наноструктур $(\text{Mg/ ZrO}_2)_N$ / А.Н. Смирнов, О.В. Стогней // Современные проблемы физики и технологий VIII - я Международная молодежная научная школа - конференция. - 2019. - Издательство: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". - с. 291-292.
20. **Смирнов А. Н.** Исследование эволюции многослойной наноструктуры Mg/NbO при отжигах / А. Н. Смирнов, О. В. Стогней // Альтернативная и интеллектуальная энергетика Материалы Международной научно-практической конференции.- 2018. - Издательство: Воронежский государственный технический университет (Воронеж). – с. 77-78.
21. **Смирнов А. Н.** Зависимость электрических свойств многослойной наноструктуры $(\text{Mg/NbO})_n$ от толщины магниевых слоев // А. Н. Смирнов, О. В. Стогней // Современные проблемы физики и технологий VII Международная молодежная научная школа-конференция. -2018. - Том Часть 1. - Издательство: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (Москва). – с. 208-209
22. Стогней О. В. Термическая стабильность многослойных наноструктур Mg/NbO / О. В. Стогней, **А. Н. Смирнов**, А. В. Ситников // Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции физика и технология наноматериалов и структур. - 2017. – Курск. - Т.1. - с. 18

Подписано в печать 31.01.2025 г.

Формат А5. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ 394006 Воронеж, ул. 20-летия
Октября, 84