

На правах рукописи

ЖИДЕЛЬ Карина Михайловна

**КЕРАМИКА И ТОНКИЕ ПЛЁНКИ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
СО СТРУКТУРАМИ ТИПА ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ ВОЛЬФРАМОВОЙ
БРОНЗЫ И ПЕРОВСКИТА: ОСОБЕННОСТИ НАНОСТРОЕНИЯ,
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Специальность

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2025

Работа выполнена в отделе интеллектуальных материалов и нанотехнологий Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Павленко Анатолий Владимирович

(Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), лаборатория наноразмерных активных сред и материалов, заведующий лабораторией)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Арефьева Людмила Павловна

(Донской государственной технической университет, факультет «Технология машиностроения», кафедра «Материаловедение и технологии металлов», доцент)

доктор технических наук, доцент
Тумаркин Андрей Вилевич

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), факультет электроники, кафедра физической электроники и технологии, профессор)

Защита диссертации состоится **29 октября 2025** года в **12.00** часов на заседании диссертационного совета **ЮФУ801.01.06** по физико-математическим наукам (специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния и 1.3.20. Кристаллография, физика кристаллов) при НИИ физики ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21 Ж и на официальном сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1346222/>.

Автореферат разослан

_____ августа 2025 года

Отзывы на автореферат (в нём укажите дату, полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail, своё согласие на обработку персональных данных) с нумерацией страниц в двух экземплярах, с заверенной подписью рецензента и печатью организации, просим направлять Гегузиной Г. А., учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.06 при НИИ физики ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, а также в формате *.pdf* – на e-mail geguzina@sfedu.ru.

Учёный секретарь диссертационного совета ЮФУ801.01.06

при НИИ физики ЮФУ

Гегузина Галина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительное развитие научно-технического прогресса характеризуется беспрецедентным ростом требований к элементной базе электронных устройств. Особое внимание уделяется разработке активных материалов, обладающих уникальными свойствами, которые могут быть реализованы на основе отечественных технологий, что способствует снижению себестоимости производства и повышению технологической независимости. В этом контексте интерес представляют сложные оксидные соединения сегнетоэлектриков и мультиферроиков со структурами типа тетрагональной вольфрамовой бронзы и перовскита [1–3], такие как $\text{Ba}_2\text{LnFeNb}_4\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ и $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$, которые могут быть реализованы в различных твердотельных состояниях как в виде монокристаллов и керамики, так и в форме тонких плёнок. Эти материалы обладают комплексом функциональных свойств, включая сегнетоэлектрические, магнитные и оптические, что делает их перспективными для применения в микро- и оптоэлектронике, СВЧ-технике. В тонкоплёночном состоянии эти материалы демонстрируют явления, нехарактерные для объёмных аналогов.

Технологические аспекты получения тонкоплёночных структур также требуют особого внимания. Однако, несмотря на значительный прогресс в исследованиях, многие аспекты, связанные с оптическими и термооптическими свойствами таких материалов, остаются недостаточно изученными, что ограничивает их практическое применение. Например, управление показателем преломления, его температурной зависимостью и другими оптическими параметрами является критически важным для разработки интегрированных оптических устройств, таких как модуляторы, дефлекторы и фотонные схемы, позволяя минимизировать негативное влияние температуры на работу устройств. При этом существующие данные о температурных зависимостях показателя преломления для тонких плёнок остаются фрагментарными и часто противоречивыми.

Исследования в этой области открывают пути для управления тепловыми воздействиями и повышения стабильности устройств. Комплексный подход к исследованию свойств указанных материалов способствует не только углублению знаний в области физики конденсированного состояния, раскрытию физических явлений, но и созданию технологической платформы для развития современной функциональной электроники, отвечающей вызовам цифровой эпохи. Учитывая вышесказанное, выбранная тема исследования является **актуальной**.

Цель работы: установить закономерности формирования фазового состава, наноструктуры, диэлектрических и оптических свойств керамики и тонких плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы и $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ со структурой типа перовскита.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– путём направленной вариации технологических параметров изготовить экспериментальные образцы керамики и тонких плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$;

– определить микро- и наноструктуру объектов, их фазовый состав и кристаллическую структуру;

– сконструировать стенд и разработать методические подходы к исследованию оптических свойств объектов в зависимости от температуры на базе оборудования российского производства;

– провести комплексные исследования диэлектрических, сегнетоэлектрических, оптических и магнитодиэлектрических характеристик образцов керамики и тонких плёнок в широком диапазоне внешних воздействий, а также оценить степень воспроизводимости и стабильность этих свойств;

– выявить взаимосвязь между структурой и макроскопическими свойствами образцов керамики и тонких плёнок на основе анализа параметров, определяющих их кристаллическую структуру и кристаллитное строение, и на основе полученных данных установить корреляционные зависимости между составом, структурой и свойствами.

Объекты исследования и их твердотельные состояния:

– *объёмная керамика:* $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ и $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$;

– *тонкоплёночные гетероструктуры на различных подложках:*

$\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ (001); $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}/\text{MgO}$ (001);

$\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ (001); $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{Pt}/\text{MgO}$ (001);

$0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3/\text{SrTiO}_3/\text{Si}$ (001).

Научная новизна. В ходе выполнения работы *впервые*

1. Методом высокочастотного катодного напыления получены эпитаксиальные беспримесные гетероструктуры $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ на подложках $\text{MgO}(001)$ и $\text{Pt}/\text{MgO}(001)$. Показано, что в образцах $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ достигаются высокие показатели энергоэффективности, а многократные циклы переполяризации плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ (вплоть до 10^9 циклов) не приводят к

деградации её сегнетоэлектрических свойств.

2. Изучены оптические свойства плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}(001)$ на основе измерений спектров пропускания в зависимости от температуры в интервале (299...453) К и определены дисперсионные зависимости оптических параметров в диапазоне длин волн (300...1000) нм. Установлено, что оптические свойства плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}(001)$ характеризуются температурной стабильностью в интервале (299...453) К.

3. Установлено, что в спектрах пропускания плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ наблюдается сдвиг края оптического поглощения в длинноволновую область с ростом температуры, что проявляется в изменении ширины запрещённой зоны этих плёнок.

4. Определены дисперсионные зависимости оптических параметров в зависимости от температуры плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ и показано, что их оптические свойства являются достаточно стабильными в температурном интервале (299...453) К и диапазоне длин волн (300...1000) нм.

5. Методом высокочастотного катодного напыления получены гетероструктуры на основе поликристаллических беспримесных плёнок $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, выращенные на подложках $\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$, и определена дисперсия оптических параметров слоёв гетероструктуры $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3/\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$ в диапазоне длин волн (350...1000) нм.

Практическая значимость полученных экспериментальных результатов комплексных исследований и сделанных на их основе выводов углубляют и конкретизируют представления о явлениях и закономерностях, проявляющихся в крупнокристаллических и наноразмерных сегнетоэлектрических и мультиферроидных структурах. Они имеют важное значение для развития физического материаловедения, а также для получения функциональных материалов для использования в области видимого диапазона, что делает их перспективными для элементной базы отечественных компонентов оптических, опто- и микроэлектронных устройств. Полученные данные можно будет использовать в дальнейшем для контроля процессов формирования структур. Сопоставление свойств объёмного материала и гетероструктур позволит очертить возможности управления свойствами за счёт проявления размерных эффектов.

Разработан методический подход для исследования оптических свойств материалов в зависимости от температуры на базе оборудования российского производства: спектрофотометра СФ-56 и криостата LN-121-SPECTR (ЦКП

ЮНЦ РАН), что позволило реализовать ряд исследований оптических свойств объектов в зависимости от температуры. Дальнейшее развитие этого подхода обеспечит дополнительный способ контроля и диагностики оптических параметров объектов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Гетероэпитаксиальные плёнки состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ толщиной 370 нм со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы на подложках $\text{MgO}(001)$ характеризуются в температурном интервале от 299 К до 453 К и в спектральном диапазоне от 300 до 1000 нм стабильными оптическими параметрами — показателем преломления $n(\lambda = 633 \text{ нм}) = 2.49 \pm 0.03$ и коэффициентом экстинкции $k(\lambda = 633 \text{ нм}) = 0.0490 \pm 0.0002$, при этом дисперсионная зависимость $n(\lambda)$ описывается формулой Зельмейера.

2. Тонкие плёнки состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы на подложках $\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ в сопоставлении с керамикой и монокристаллом исходного состава при температурах выше комнатной обладают сегнетоэлектрической поляризацией и высокой энергоэффективностью, что обусловлено смещением температуры фазового перехода сегнетоэлектрик \rightarrow параэлектрик в область высоких температур и отсутствием в плёнках примесных фаз $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ и различных модификаций оксида железа.

3. В гетероэпитаксиальных плёнках состава $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ толщиной 640 нм со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы на подложках $\text{MgO}(001)$, несмотря на наличие в плоскости сопряжения плёнка–подложка ростовых доменов, анизотропные свойства отсутствуют, а величины показателя преломления n и коэффициента экстинкции k в температурном интервале от 299 К до 453 К и в спектральном диапазоне от 300 до 1000 нм сохраняются стабильными.

4. Керамика мультиферроика $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ со структурой типа перовскита обладает при $T < 445 \text{ К}$ сегнетоэлектрическими свойствами, антиферромагнитными свойствами и магнитодиэлектрическим эффектом, а выявленная дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур от 370 К до 520 К и частот от 20 до 10^6 Гц описывается при учёте двух вкладов в диэлектрический отклик, обусловленных фазовым переходом сегнетоэлектрик–релаксор \rightarrow параэлектрик и поляризацией Максвелла–Вагнера.

Достоверность и обоснованность результатов базируются на применении взаимодополняющих экспериментальных методов и теоретических расчётов,

обеспечивающих их высокую степень воспроизводимости и валидности данных. Консенсус результатов, полученных различными методами, свидетельствует о надёжности и точности проведённых исследований. Используемые методики прошли апробацию и соответствуют установленным метрологическим стандартам, что гарантирует прецизионность измерений, которые проведены на большом числе образцов керамики и тонких плёнок для оценки воспроизводимости и стабильности их свойств. Степень достоверности результатов подтверждается рядом публикаций в изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных (БД), свидетельствуя о высоком уровне научной экспертизы и признании результатов исследования в международном научном сообществе. **Надёжность** результатов подтверждается их соответствием актуальным концепциям физики конденсированного состояния.

Апробация результатов. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на конференциях, симпозиумах и форумах: Int. Conf. on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (2020–2024); Int. Conf. Materials Science and Nanotechnology, Ekaterinburg (2023–2024); Междунар. науч. конф. студ., асп. и молодых учёных «Ломоносов», Москва (2021–2023); Int. Conf. «Materials science of the future: research, development, scientific training», Nizhny Novgorod (2022); Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных «Инновационные материалы и технологии», Минск (2022); Междунар. междисципл. молодёжн. симп. «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование экосистем (Анализ современного состояния и перспективы развития)», Ростов-на-Дону (2020–2024); 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» памяти ак. Н. П. Сажина, Москва (2022); Междунар. науч. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», Краснодар (2020–2022, 2024); Междунар. науч.-практ. конф. «Открытые физические чтения», Луганск (2020–2021); Шестом междисципл. науч. форуме с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии», Москва (2020); Online Int. Conf. on Advanced Materials, India (2020); Междунар. онлайн-конф. «Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учёными. Столетие открытия сегнетоэлектричества», Екатеринбург (2020); IV Междунар. симп. «Современное материаловедение», Москва (2020). Всерос. науч. конф. студ.-физиков и молодых учёных (2022–2023); Всерос. науч. молодёжн. школе-конф. «Химия, физика, биология: пути интеграции», Москва (2020–2022); XII Всерос. науч.-практ. молодёжн. конф. «Студенческая научная весна», Волгоград (2022); XXII Всерос. конф. по физике сегнетоэлектриков, Екатеринбург (2021); III молодёжн. всерос. с междунар. участием науч. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения», Ростов-на-Дону (2021); XVIII Рос. ежегод. конф. молодых науч. сотр. и асп. «Физико-химия и технология неорганических материалов», Москва (2021); XIX Всерос. молодёжн. науч. конф. «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение», Санкт-Петербург (2020). XIX Ежегод. молодёжн. науч. конф. «Достижения и перспективы научных исследований молодых учёных Юга России», Ростов-на-Дону (2023); XVIII Ежегод. молодёжн. науч. конф. «Наука Юга России: достижения и перспективы», Ростов-на-Дону (2022); XII Конф. молодых учёных по общей и неорганической химии, Москва (2022); V Школе-конф. молодых учёных «Прохоровские недели», Москва (2022); IV семинаре «Современные нанотехнологии», Екатеринбург (2022); XVII Ежегод. молодёжн. науч. конф. «Наука и технологии Юга России», Ростов-на-Дону (2021); Науч.-практ. конф. «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», Москва (2021); Науч. чтения имени И. А. Одингса «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва (2020); XVI Ежегод. молодёжн. науч. конф. «Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы», Ростов-на-Дону (2020).

Публикации автора. По теме диссертации опубликовано 47 работ, из которых четыре статьи в журналах, включённых в БД Scopus и Web of Science, пять — в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК

РФ, остальные 38 работ — в сборниках трудов конференций, индексируемых в БД РИНЦ. Получено одно свидетельство регистрации программы для ЭВМ. Основные публикации автора отмечены литерой А и помещены в конце автореферата.

Личный вклад. Автором сделан литературный обзор по теме диссертации, проведены измерения макроскопических свойств образцов керамики и тонких плёнок в широком диапазоне внешних воздействий и обработаны экспериментальные данные. Выполнено компьютерное оформление графической и текстовой документации. Совместно с научным руководителем был определён вектор научного поиска, сформулирована тема, поставлены цель и ключевые задачи работы, проведено обсуждение и обобщение полученных в диссертации результатов, а также сформулированы выводы, отражающие основные научные положения, которые выносятся на защиту. Соискатель принял участие в постановке экспериментов и их проведении, разработке и созданию методического подхода и специализированного измерительного стенда для исследования оптических свойств в зависимости от температуры, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, написании совместных научных статей и подготовке их к опубликованию, представлял доклады по теме диссертации на конференциях. Ряд работ выполнен соискателем при участии сотрудников НИИ физики ЮФУ, ЮНЦ РАН и других научных организаций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 185 наименований и двух приложений, изложенных на 205 страницах, включая 104 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обсуждается актуальность темы научных исследований, формулируются цель и задачи работы; приводятся объекты исследования и их твердотельные состояния, научная новизна, практическая значимость; представляются выносимые на защиту основные научные положения, описываются достоверность и надёжность результатов работы, публикации по теме диссертации.

В **первом разделе** дан аналитический литературный обзор об исследуемых объектах, посвящённый современному состоянию экспериментальных и теоретических исследований активных материалов на основе сегнетоэлектриков и мультиферроиков со структурами типа тетрагональной вольфрамовой бронзы (ТВБ) ($Ba_2LnFeNb_4O_{15}$, $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$) и перовскита $((1-x)BiFeO_3-$

$x\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$). Описаны перспективы применения в современной технике исследуемых функциональных материалов в виде керамики, монокристаллов и тонких плёнок, в которых сочетаются различные функциональные свойства.

Во **втором разделе** описываются методы получения и исследования экспериментальных образцов в виде керамики и тонких плёнок. Образцы в керамическом исполнении получали твердофазным синтезом в воздушной атмосфере с последующим спеканием по обычной керамической технологии. Измерительные образцы изготавливали в виде дисков с $d = (10-15)$ мм и $h = (1-2)$ мм. Керамические мишени стехиометрических составов были приготовлены в виде крупногабаритных дисков $d = 50$ мм и $h = 3$ мм. Тонкие плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ получали при высокочастотном распылении соответствующих мишеней на различных напылительных установках. Для проведения диэлектрических измерений использовали электроды из Pt и Ag/Pd. Поляризацию керамики осуществляли посредством горячей поляризации.

Рентгенодифракционные исследования (РДИ) порошковых и керамических образцов проводились на дифрактометрах «ДРОН-3» и «ДРОН-4-07», гетероструктур — на многофункциональном рентгеновском комплексе «РИКОР».

Микроструктура объектов анализировалась на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40 (оснащён приставкой Oxford «Inca Energy» для анализа состава); 3D-сканирующем лазерном микроскопе Keyence VK-9700 (408 нм). Топография и процессы локального переключения плёнок были получены на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Academia.

Мёссбауэровские спектры измерены с помощью спектрометра MS1104Em. Измерения магнитодиэлектрического эффекта (МДЭ) при $B = (0-0.86)$ Тл, $f = (20-2 \cdot 10^6)$ Гц и $T = (300-750)$ К проводились на стенде на базе LCR-метра Agilent 4980A и программного обеспечения (ПО) Kalipso v.2.0.0.27.

Измерения петель диэлектрического гистерезиса (ДГ) осуществляли с помощью анализатора TFAalyzer2000 (при $T = (123-373)$ К) и осциллографической установки Сойера–Тауэра (при $T = (293-573)$ К). Измерения относительной комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*/\varepsilon_0 = \varepsilon'/\varepsilon_0 - i\varepsilon''/\varepsilon_0$ (ε' и ε'' — действительная и мнимая части ε^* соответственно, ε_0 — диэлектрическая постоянная) производили при $f = (20-2 \cdot 10^6)$ Гц и $T = (10-320)$ К с помощью анализатора импеданса Wayne Kerr 6500, гелиевого криостата CCS-150 и термоконтроллера LakeShore 331, а при $T = (300-1000)$ К — на базе LCR-метра Agilent E4980A и терморегулятора Варта ТП703.

Управление комплексом осуществлялось ПО Kalipso v.2.0.0.27.

Спектры эллипсометрических параметров (Ψ , Δ) при комнатной температуре (КТ) регистрировались при помощи спектрального эллипсометра «ЭЛЛИПС-1991» (ЦКП ЮНЦ РАН) в диапазоне $\lambda = (350-1000)$ нм в воздушной атмосфере при углах падения излучения относительно нормали к поверхности $\varphi = 45^\circ-70^\circ$. Управление эллипсометром и расчёты проводились через встроенное ПО «Спектроскан». Регистрация спектров направленного пропускания при КТ проводилась в диапазоне $\lambda = (200-1000)$ нм с помощью спектрофотометра «СФ-56» (ЦКП ЮНЦ РАН). Для измерения спектров пропускания в диапазоне $T = (299-453)$ К в вакууме была собрана измерительная система на базе «СФ-56», оптического криостата LN-121-SPECTR и контроллера температуры «ОВЕН».

В третьем разделе изложены результаты исследований керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, которая в дальнейшем использовалась для получения тонких плёнок данного состава. Она является однофазным, беспримесным материалом с высокой плотностью и однородной зёрненной структурой. Образцы керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ обладали структурой ТВБ при КТ и параметрами ячейки: $a = 12.477 \text{ \AA}$ и $c = 3.923 \text{ \AA}$. Выявлено, что при $T = (10-320)$ К и $f = (2 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^6)$ Гц на зависимостях $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ присутствуют два частотно-зависимых максимума [A44] при значениях T_{m1} и T_{m2} (рисунок 1).

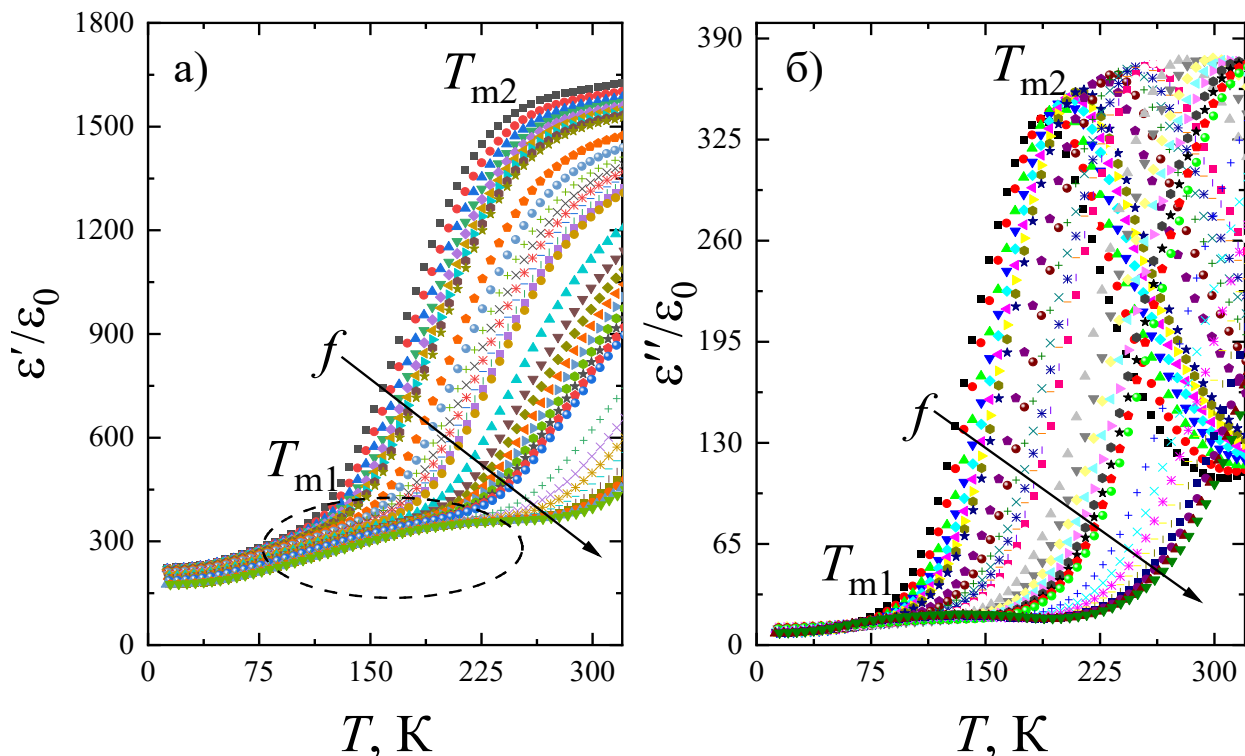


Рисунок 1 — Зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$ (а) и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T)$ (б) керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$

Анализ диаграмм Коула–Коула при различных температурах показал, что в керамике $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ в диэлектрическом отклике проявляются два релаксационных процесса недебаевского типа. Аномалии на зависимостях $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ при $T = (100\text{--}200)$ К обусловлены размытым фазовым переходом (ФП) из полярной фазы в неполярную, а наличие диэлектрической дисперсии в этой области и зависимость T_{m1} от f указывают на принадлежность данного материала в виде керамики к сегнетоэлектрикам-релаксорам (СЭР).

С учётом данных, полученных для керамических материалов, были изучены плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, выращенные на подложках $\text{MgO}(001)$ [A18, A22, A43]. На их рентгенограммах (рисунок 2 а) присутствуют только отражения от плёнки и подложки, следов примесных фаз, в том числе $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, не обнаружено.

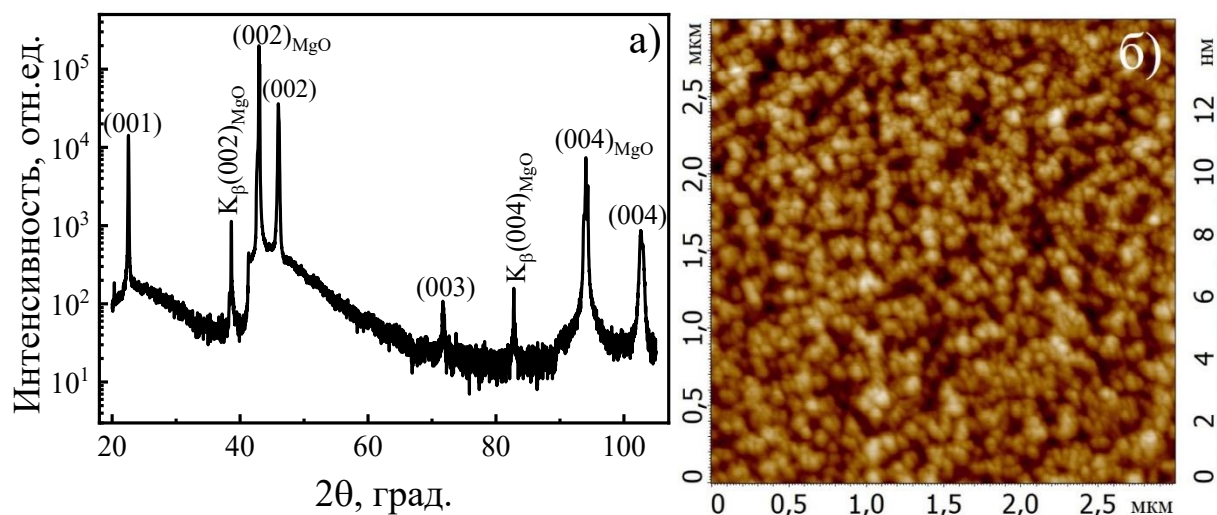


Рисунок 2 — Рентгенограмма θ – 2θ -сканирования гетероструктуры $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}(001)$ (а) и топография её поверхности (б) размером 3×3 мкм²

Наноструктура плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ характеризуется отсутствием инородных включений, пустот и иных дефектов (рисунок 2 б). Плёнка $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ получена эпитаксиально на подложке MgO : в направлении нормали к поверхности подложки кристаллографические оси $[001]$ плёнки и подложки сонаправлены, а в плоскости сопряжения наблюдается формирование ориентационных доменов с разворотом осей $[100]$ и $[010]$ плёнки на $\pm 18.4^\circ$ относительно соответствующих осей подложки. Параметры элементарной ячейки плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ составляют $a = 12.45$ Å и $c = 3.945$ Å.

Из результатов эллипсометрических измерений установлено, что, несмотря на наличие ростовых доменов, синтезированную плёнку $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ можно рассматривать в рамках изотропной модели [A32]. Температурно-зависимое поведение оптических свойств материала $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ анализировалось по зависимостям спектров пропускания при различных температурах. В оптических

экспериментах мы исследовали на первом этапе подложки, на которые непосредственно напылялись плёнки, поскольку реальные значения оптических параметров (показателя преломления n и коэффициента экстинкции k) подложек могут отличаться от справочных значений. Плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ демонстрируют оптическую прозрачность (55 %–85 %) в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра (рисунок 3 а) [A35–A37].

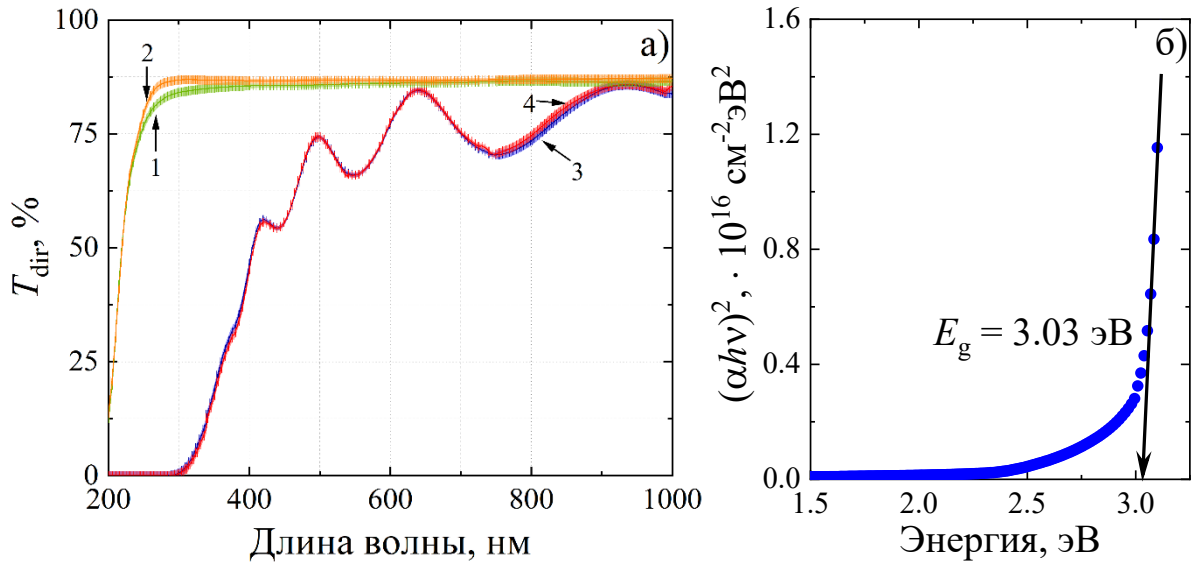


Рисунок 3 — Спектры пропускания $T_{\text{dir}}(\lambda)$: а) 1,2 — подложка MgO, 3,4 — гетероструктура $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ при $T = 299$ К и 453 К, соответственно (величины приведены с учётом абсолютных погрешностей); б) зависимость $(\alpha h\nu)^2 = f(E)$

При повышении температуры уровень оптического пропускания как самих плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ [A30], так и подложки MgO, претерпевает лишь незначительные изменения [A24–A25]. Сдвига края оптического поглощения не выявлено, а наблюдаемые изменения находились в пределах допустимых абсолютных погрешностей измерений. Это указывает на стабильность оптических параметров материалов при заданном температурном режиме [A1, A28], что является важным аспектом при их практическом применении.

Ширина запрещённой зоны E_g , рассчитанная с использованием приближения Тауца (рисунок 3 б) в предположении прямого разрешённого перехода, составила 3.03 эВ. Дисперсионная зависимость $n(\lambda)$ плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ имеет нормальный ход (рисунок 4) и хорошо описывается соотношением Зельмейера при следующих параметрах $\lambda_0 = 217$ нм и $S_0 = 1.36 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. В спектральном диапазоне $\lambda = (700–1000)$ нм показатель преломления практически постоянен и равен 2.44 ± 0.03 , что сопоставимо с литературными данными для соединений кислородно-октаэдрического типа. При $\lambda = (550–1000)$ нм дисперсия $k(\lambda)$ практически отсутствует и k составляет 0.0490 ± 0.0002 , что говорит о достаточно низких потерях в данном диапазоне.

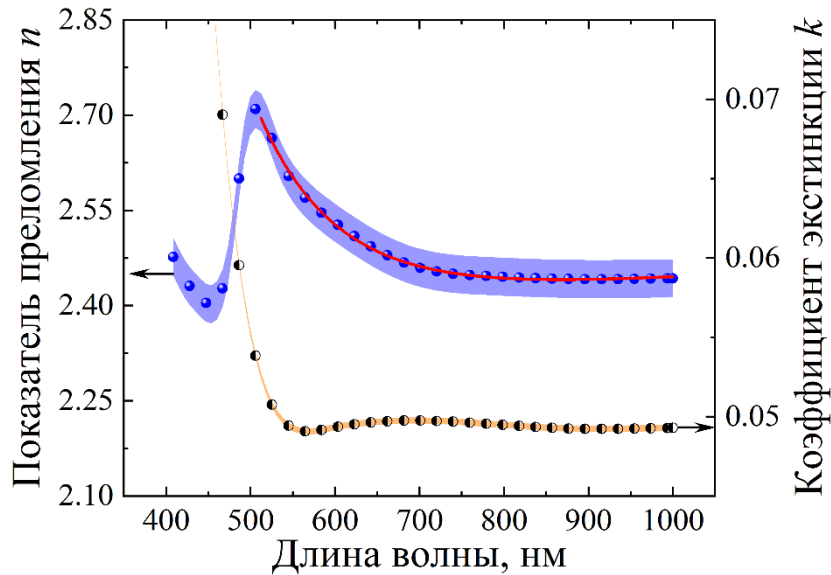


Рисунок 4 — Дисперсия оптических параметров плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}$ при КТ: линия – результаты аппроксимации по формуле Зельмейера, точки – экспериментальные данные (величины n и k приведены с учётом абсолютных погрешностей)

Для исследования диэлектрических и сегнетоэлектрических (СЭ) свойств были сформированы конденсаторные структуры $\text{Pt}/\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}$ [A2]. При $T = (83\text{--}473)$ К (рисунок 5) значения ϵ'/ϵ_0 плёнки сопоставимы с $\epsilon_{//}/\epsilon_0$ монокристаллов $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ и превышают таковые для керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$. Как в случае керамики и монокристаллов, так и в плёнках $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ присутствует дисперсия ϵ'/ϵ_0 и $\text{tg } \delta$, которая обусловлена спецификой СЭ фазы и поляризацией типа Максвелла–Вагнера. Максимальные значения $\Delta\epsilon/\epsilon_0 \sim 200$ и $\text{tg } \delta \sim 0.35$ наблюдаются при 473 К.

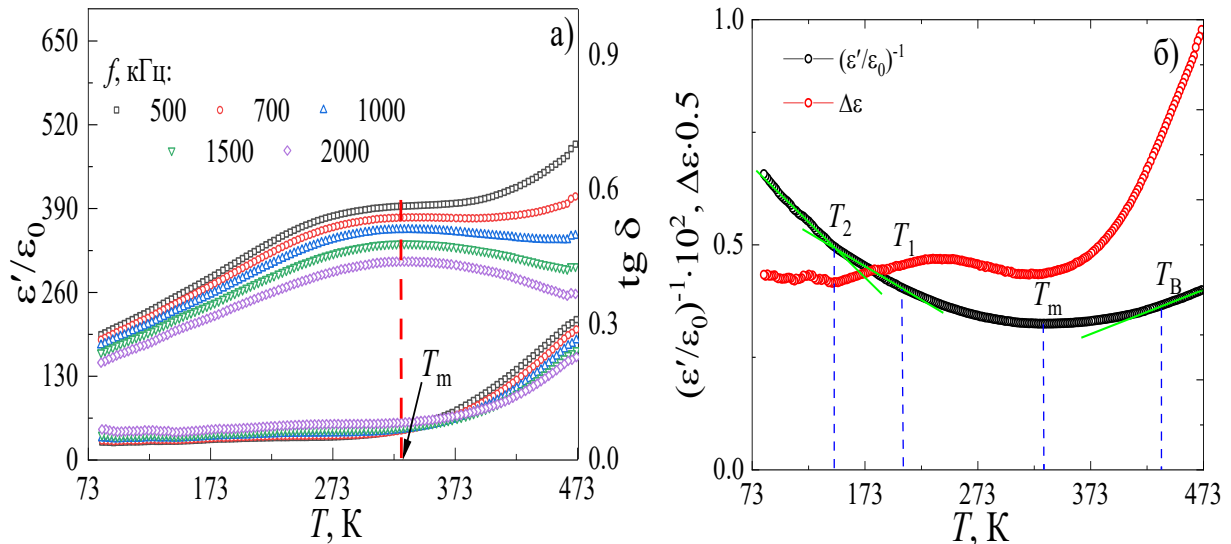


Рисунок 5 — Зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$ и $\text{tg } \delta(T)$ (а), $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T, f = 2 \text{ МГц})$ и $\Delta\epsilon(T)$ (б) гетероструктуры $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}/\text{MgO}$

По мере снижения температуры на зависимостях $\epsilon'/\epsilon_0(T)$ формируются размытые максимумы при 329 К и слабо выраженные изломы при 148 К. На

зависимости $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ (рисунок 5 б) выделяется 4 температурных диапазона, только в одном из которых ($T_1 < T < T_B$) зависимость $(\epsilon'/\epsilon_0)^{-1}(T)$ отлична от линейной. Это свидетельствует о фазовых превращениях в $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ как в окрестности максимума на зависимости $\epsilon'/\epsilon_0(T)$, так и при температуре 148 К. Наличие СЭ свойств в плёнке подтвердилось при изучении петель ДГ — зависимость $P(U)$ имела характерный для СЭ вид и была смещена в область отрицательных полей из-за наличия внутреннего поля в плёнке (рисунок б).

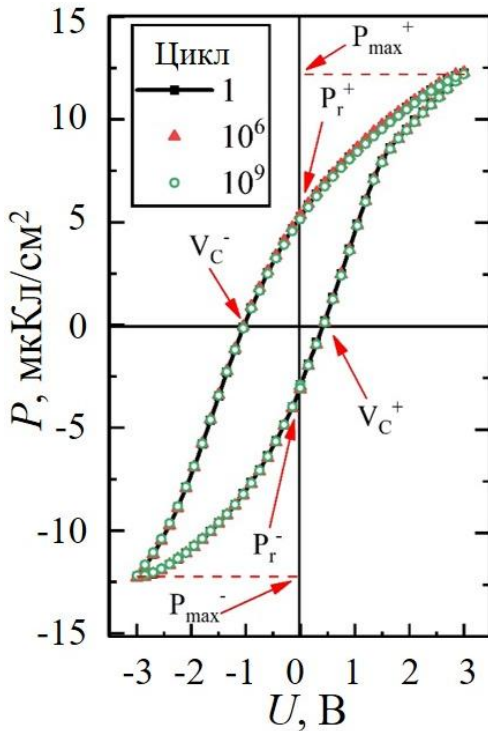


Рисунок 6 — Зависимости $P(U)$ при КТ гетероструктуры $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}/\text{MgO}$

При анализе СЭ усталости плёнки установлено, что деградация СЭ параметров практически не фиксируется вплоть до 10^9 циклов переключения [A2].

При приложении внешнего поля к образцу энергия системы накапливается и в дальнейшем выделяется в виде полезной энергии во время разрядки, при этом часть энергии рассеивается. В этом случае используется характеристика:

$$W_{st} = \int_{P_R}^{P_{max}} E dP, \quad W_{re} = \int_{P_{max}}^{P_R} E dP,$$

где W_{st} — энергия, накопленная во время зарядки, W_{re} — восстановленная полезная энергия, P_R — остаточная поляризация, P_{max} — максимальная поляризация, E — приложенное электрическое поле.

Гистерезисные потери энергии рассчитываются как $W_{loss} = W_{st} - W_{re}$, а энергоэффективность как $\eta = (W_{re} / W_{st}) \cdot 100 \%$.

Для плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ характерны следующие параметры:

при $T = 273$ К: $W_{loss} = 3.401$ Дж/см³, $W_{st} = 14.122$ Дж/см³, $\eta = 76 \%$;

при $T = 313$ К: $W_{loss} = 0.540$ Дж/см³, $W_{st} = 2.843$ Дж/см³, $\eta = 81 \%$.

Таким образом, достаточно высокие значения поляризации в плёнках $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ и низкие коэрцитивные поля приводят к высоким значениям энергоэффективности. Описанные выше результаты позволили сформулировать *первое* и *второе* научные положения, выносимые на защиту.

В **четвёртом разделе** отражены результаты исследований тонких плёнок ниобата бария-стронция конгруэнтного состава $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$. По данным РДИ плёнки являются беспримесными и монокристаллическими (рисунок 7) [A21, A45]. При ф-сканировании отражений (221) и (311) установлен

эпитаксиальный рост, а распределение интенсивностей этих рефлексов объясняется наличием двух ориентационных доменов $\pm 18.4^\circ$.

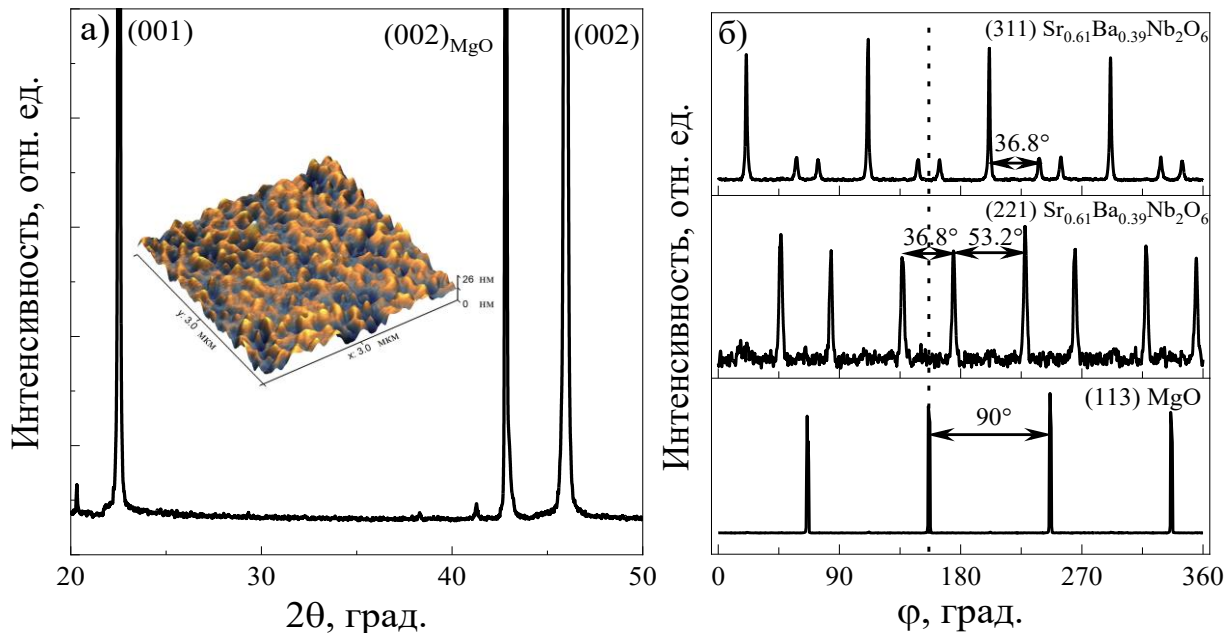


Рисунок 7 — Рентгенограмма θ – 2θ -сканирования гетероструктуры $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ (а), на вставке — трёхмерное изображение фрагмента поверхности размером 3×3 мкм²; ϕ -сканы рефлексов (221), (311) плёнки и (113) подложки (б)

В плёнках с $h > 190$ нм кристаллическая структура практически не деформирована в плоскости сопряжения и растянута вдоль полярной оси c [A3]. Результаты АСМ в сочетании с РДИ указывают на рост плёнок по механизму Фольмера–Вебера, их высокое структурное совершенство и наноструктуру без посторонних включений, пустот или иных дефектов. При проведении диэлектрических исследований в плёнке $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, как и в монокристаллах, наблюдается характерное для СЭР поведение. Для проверки существования анизотропии оптических свойств в плоскости плёнки измерялись эллипсометрические спектры (рисунок 8) в разной геометрии [A26].

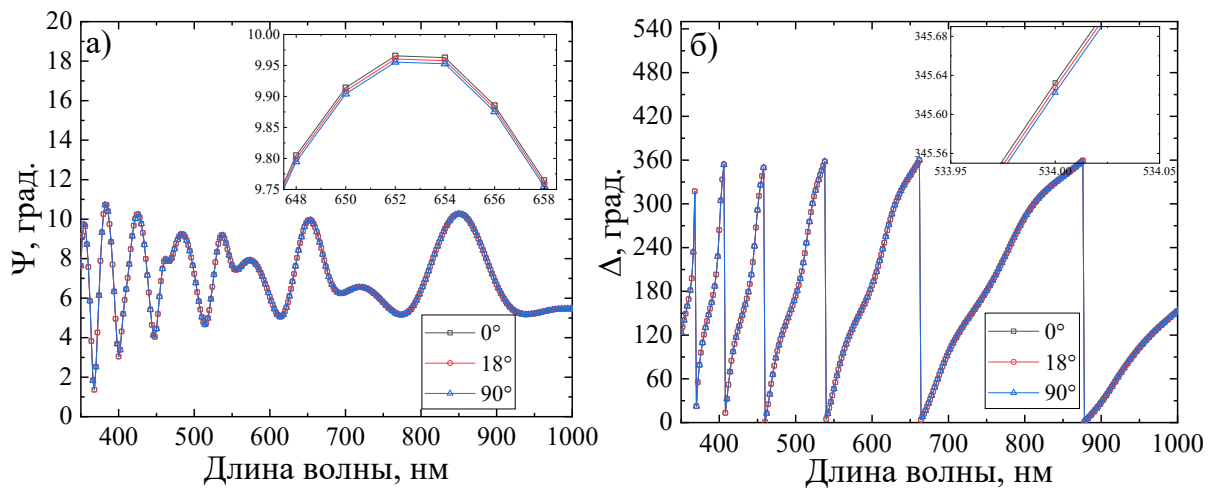


Рисунок 8 — Эллипсометрические спектры плёнки $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ в зависимости от азимутального угла

Эллипсометрические измерения показали, что поворот плоскости падения зондирующего излучения не приводит к изменению значений Ψ и Δ , и, следовательно, плёнки $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ можно рассматривать в рамках изотропной модели, а наличие ориентационных доменов, обусловленное спецификой согласования кристаллических решёток плёнки и подложки, не оказывает влияния на оптический отклик [A12–A13]. Плёнки $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ демонстрируют высокую прозрачность (64 %–85 %) в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра (рисунок 9 а).

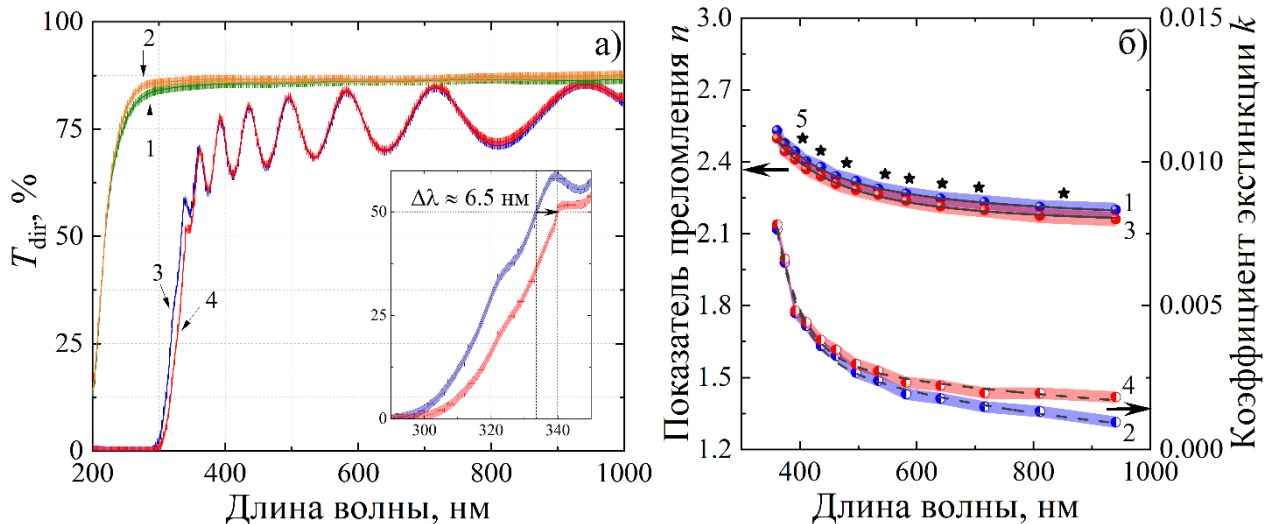


Рисунок 9 — Спектры пропускания $T_{\text{dir}}(\lambda)$: а) 1,2 — подложка MgO, 3,4 — гетероструктура $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ при $T = 299$ К и 453 К, соответственно; на вставке — область края поглощения; б) дисперсия оптических параметров при $T = 299$ К и 453 К. Линиями обозначены результаты аппроксимации по формуле Коши: сплошная (1,3) — $n(\lambda)$, штриховая (2,4) — $k(\lambda)$; 5 — n_0 монокристалла $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (величины приведены с учётом абсолютных погрешностей)

Видно, что с увеличением температуры уровень оптического пропускания $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ и самой подложки незначительно изменяется [A29]. Причём в спектрах пропускания $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ наблюдается заметное смещение края оптического поглощения (рисунок 9 а) с ростом температуры в длинноволновую область. Смещение края оптического поглощения ($\Delta\lambda$) на уровне пропускания материала в 50 % составило ~ 6.5 нм. Плёнки $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ обладают немного более низким n [A33] в исследуемом спектральном диапазоне в сравнении со значениями обыкновенного показателя преломления (n_0) монокристалла $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ при КТ. С ростом температуры наблюдается дальнейшее снижение n , которое, однако, находится в пределах допустимой абсолютной погрешности, что свидетельствует о стабильности оптических характеристик плёнок в заданном диапазоне длин волн и температур. Энергия Урбаха при КТ плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ составляет ~ 0.216 эВ и

увеличивается с ростом температуры до ~ 0.249 эВ, что говорит о снижении упорядоченности структуры. Природа запрещённой зоны плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ характеризуется как прямого типа в области более высоких энергий и непрямого типа в области низких энергий [A10]. Уменьшение вклада энергии фононов E_{ph} с ростом температуры может быть связано с растяжением Nb–O и деформацией O–Nb–O из-за внутренних колебаний октаэдров NbO_6 . Отмеченное подтверждает, что при температуре выше 380 К происходит ФП. Наши оценки дают изменение $dE_g/dT \approx -0.0005$ эВ/К⁻¹ в области от КТ до 453 К. К уменьшению E_g может приводить рост амплитуды тепловых колебаний атомов кристаллической решётки и изменение расстояний между атомами при термическом расширении. Описанные выше результаты позволили сформулировать *третье* научное положение, выносимое на защиту.

Пятый раздел посвящён изучению мультиферроика твёрдого раствора (ТР) состава $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$. Формирование беспримесной керамики $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ со структурой, близкой к кубической ($a = 3.9995$ Å) при КТ показано при РДИ [A11, A42]. Зёрненная структура керамики является плотной и формируется из имеющих форму неправильных многоугольников кристаллитов [A8]. В интервале температур (10–300) К (рисунок 10) по мере роста T происходит монотонное увеличение $\varepsilon'/\varepsilon_0$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0$ на фоне постепенного нарастания диэлектрической дисперсии [A6, A39].

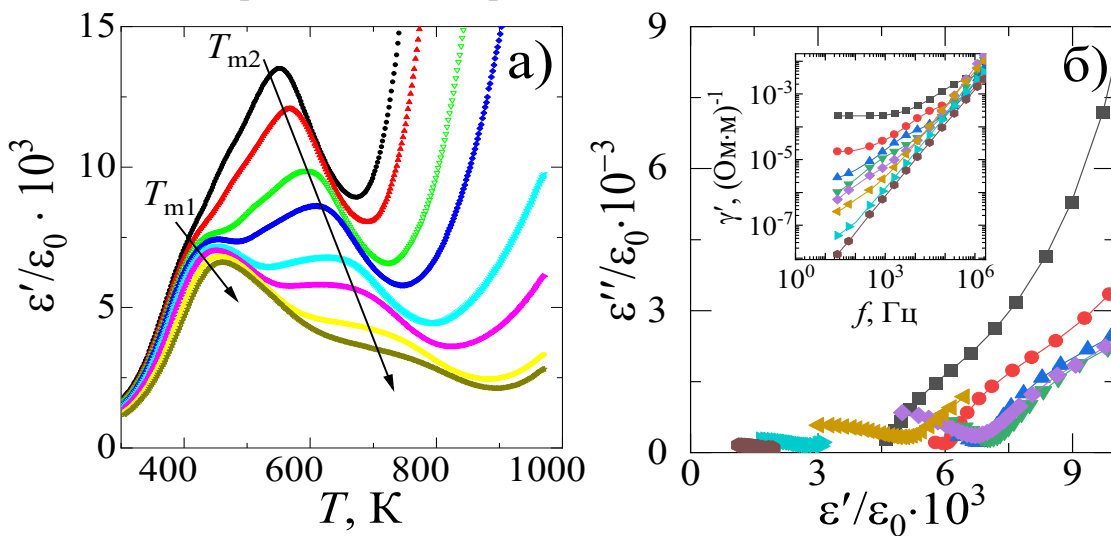


Рисунок 10 — Зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ (а) и $\varepsilon''/\varepsilon_0(\varepsilon'/\varepsilon_0)$ (б) керамики $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, на вставке — $\gamma'(f)$

В высокотемпературной области спецификой зависимостей $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ является наличие двух частотно-зависимых максимумов при T_{m1} и T_{m2} . Первый максимум $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и предшествующий ему максимум $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ являются типичными для СЭР, а именно высота релаксирующих максимумов $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ с

увеличением f и T уменьшается, а максимумов $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ растёт [A27, A41].

Характерной особенностью зависимостей $\varepsilon''/\varepsilon_0(T)$ при $T > T_{m1}$ является быстрый рост $\varepsilon''/\varepsilon_0$ при T , повышающихся по мере увеличения f . Это вызвано ростом сквозной проводимости, дающей значительный вклад в $\varepsilon''/\varepsilon_0$ [A46]. Полученные результаты позволяют связать аномалии $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ при $T = (373-523)$ К с ФП СЭР \rightarrow параэлектрик (ПЭ) [A48]. В пользу этого свидетельствует анализ зависимости $T_{m1}(f)$ путём аппроксимации соотношением Фогеля–Фулчера ($E_{act} = 0.006$ эВ, $f_0 = 5 \cdot 10^7$ Гц и $T_f = 460$ К). Из анализа зависимостей $(\varepsilon'/\varepsilon_0)^{-1}(T)$ установлено, что $T_B \sim 553$ К.

Для более детального анализа диэлектрических спектров нами были изучены зависимости $\varepsilon'/\varepsilon_0(f)$, $\varepsilon''/\varepsilon_0(f)$, $\gamma'(f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(\varepsilon'/\varepsilon_0)$ (диаграммы Коула–Коула) (рисунок 10 б). На диаграммах Коула–Коула мы наблюдали сначала одну дугу полуокружности ($T = 298$ К), при $T = (333-473)$ К — две разделённые по частоте дуги полуокружностей, а при $T > 473$ К — опять одну. Это свидетельствует о наличии двух релаксационных процессов, дающих вклад в диэлектрический отклик керамики $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$. Первый превалирует при $T < 423$ К, а второй — при $T > 573$ К. Из температурной эволюции зависимостей следует, что процессы полностью частотно разделены. Характер зависимости $\gamma'(f)$ при $T > 473$ К (выход на плато в низкочастотной области) свидетельствовал о необходимости учёта при аппроксимации зависимостей вклада сингулярного члена $\gamma'_{\omega \rightarrow 0}/(\varepsilon_0 \cdot f)$, определяемого вкладом сквозной проводимости объекта. С повышением температуры в объекте наблюдается увеличение электропроводности, что при полевом воздействии приводит к накоплению свободных зарядов на границах раздела различных сред из-за различий в их диэлектрических характеристиках (особенно на границах зёрен), что и вызывает возникновение поляризации Максвелла–Вагнера. Форма зависимостей $\varepsilon''/\varepsilon_0(\varepsilon'/\varepsilon_0)$ указывает на недебаевский характер обоих релаксационных процессов в керамике, что подтверждается при их модельном описании. Релаксационные свойства керамики $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ обусловлены как разупорядочением структуры, так и спецификой дефектной подсистемы.

Результаты исследования МДЭ [A5] в керамике $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ при $T = 298$ К, $f = (10^2-10^6)$ Гц и $B = (0-0.86)$ Тл демонстрируют, что при $B = 0$ Тл с увеличением f величина $\varepsilon'/\varepsilon_0$ монотонно убывает от 1150 до 750 на всех частотах измерительного электрического поля, а $\varepsilon''/\varepsilon_0$ — увеличивается с 40 до 104 [A20]. Приложение поля приводит к отрицательным значениям магнитодиэлектрического коэффициента, $MD \sim -0.4$ %. Более сложное поведение наблюдается для $\varepsilon''/\varepsilon_0$: при $f = 10^3$ Гц величина

магнитодielekтрического коэффициента dielectricких потерь $ML \sim 0\%$, а по мере увеличения f величина ML по модулю возрастает и достигает -0.5% . Это свидетельствует об усилении МДЭ в ТР $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ по сравнению с крайними компонентами квазибинарной системы. Приложение к образцу постоянного магнитного поля приводит к незначительным изменениям $\varepsilon'/\varepsilon_0$ при $T = (473-523)$ К. При температурах ниже 473 К, в интервале (473–523) К, в магнитном поле значения $\varepsilon'/\varepsilon_0$ уменьшаются ($MD < 0$), а при $T = (343-423)$ К — увеличиваются ($MD > 0$). Максимальная величина фиксируемого МДЭ составляет 1.64 %. По данным исследований эффекта Мёссбауэра [А8] керамики $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ установлено, что значение изомерного сдвига секстетов характерно для ионов Fe^{3+} в кислородных октаэдрах, а T_N составляет ~ 445 К. Учитывая полученные результаты можно заключить, что ТР $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ при КТ находится в антиферромагнитной фазе [А9]. Описанные выше результаты позволили сформулировать **четвёртое** научное положение, выносимое на защиту.

С учётом данных полученных для керамики были напылены гетероструктуры $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3/\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$ [А34], обладающие беспримесной поликристаллической структурой с текстурой в направлении 001 и малой деформацией элементарной ячейки [А7, А17]. С помощью спектральной эллипсометрии определены толщины и дисперсия оптических параметров слоёв гетероструктуры $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3/\text{SrTiO}_3/\text{Si}(001)$ [А4, А31] в диапазоне длин волн (350–1000) нм [А15–А16, А19, А38]. Показано, что значение показателя преломления плёнок $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ близко к таковому для BiFeO_3 и $\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Однофазная и беспримесная керамика состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, обладающая структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы с параметрами элементарной ячейки $a = 12.477 \text{ \AA}$ и $c = 3.923 \text{ \AA}$, характеризуется высокой плотностью и однородной зёрненной структурой.

2. Аномалии, наблюдаемые на зависимостях $\varepsilon'/\varepsilon_0(T, f)$ и $\varepsilon''/\varepsilon_0(T, f)$ при $T = (100-200)$ К керамики состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, обусловлены размытым фазовым переходом из полярной фазы в неполярную, а наличие dielectricкой дисперсии в этой области и характер зависимости T_{m1} от f свидетельствуют о принадлежности данного материала к сегнетоэлектрикам-релаксорам.

3. Плёнки состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$, выращенные эпитаксиально на подложках $\text{MgO}(001)$ и не содержащие примесей, обладают структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы с параметрами элементарной ячейки

$a = 12.451 \text{ \AA}$ и $c = 3.945 \text{ \AA}$, что указывает на деформацию элементарной ячейки плёнок по сравнению с объёмным материалом.

4. Плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}(001)$ в области длин волн, превышающих 400 нм, практически прозрачны. Показатель преломления на длине волны 633 нм составляет 2.49 ± 0.03 , при этом коэффициент экстинкции равен 0.0490 ± 0.0002 , что указывает на низкие оптические потери в указанном диапазоне. Плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{MgO}(001)$ обладают температурной стабильностью оптических характеристик в исследуемом спектральном диапазоне.

5. Плёнки состава $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ на подложке $\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ ориентированы вдоль оси c , однофазны и беспримесны. Элементарная ячейка плёнки претерпевает деформацию в направлении полярной оси, при этом параметр c плёнки достигает значения 3.976 \AA , превышая аналогичный параметр для объёмного материала, что приводит к проявлению сегнетоэлектрических свойств при комнатной температуре. Сегнетоэлектрические параметры плёнки остаются практически неизменными при комнатной температуре даже после 10^9 циклов переключения.

6. В плёнках $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ при $T = (83\text{--}473) \text{ K}$ обнаружены два фазовых перехода: первый, из параэлектрического состояния в сегнетоэлектрическое, происходит в интервале температур от 206 К до 433 К, а второй, из сегнетоэлектрического состояния в сегнетоэлектрическое, — при температуре 148 К. В диапазоне температур от 273 К до 313 К плёнки $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ демонстрируют высокую энергоэффективность, превышающую 76 %.

7. В структуре монокристаллических беспримесных плёнок состава $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, выращенных на подложках $\text{MgO}(001)$, со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы обнаружены два типа ростовых ориентационных доменов, обусловленных механизмом роста плёнок по модели Фольмера–Вебера, при этом морфология поверхности не указывает на наличие блочной структуры, сформированной этими доменами.

8. Спектрально-эллипсометрические измерения параметров Ψ и Δ плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ выявили независимость фиксируемых параметров от поворота плоскости падения зондирующего излучения, указывая на отсутствие влияния наличия в плоскости сопряжения плёнка–подложка ростовых доменов, что позволяет рассматривать объекты в рамках изотропной модели плёнки.

9. Плёнки $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ характеризуются достаточно стабильными оптическими характеристиками в интервале температур от 299 К до 453 К в исследуемом спектральном диапазоне, причём для комнатной

температуры показатель преломления плёнок на длине волны 633 нм составляет 2.25 ± 0.03 , а коэффициент экстинкции — 0.0010 ± 0.0002 .

10. Гетероструктуры на основе тонких эпитаксиальных плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, выращенные на подложках Pt(001)/MgO(001), не содержат примесей и демонстрируют свойства сегнетоэлектрика-релаксора подобно монокристаллам и керамикам, что подтверждается характером зависимостей диэлектрических свойств и свидетельствует о том, что флуктуации химического состава, присущие материалам со структурой типа тетрагональной вольфрамовой бронзы, проявляются и в плёночных структурах, а диэлектрический отклик при фазовом переходе из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое в значительной степени определяется динамикой полярных нанобластей.

11. Беспримесная керамика состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, обладающая структурой, близкой к кубической, с параметрами элементарной ячейки $a = c = 3.9995 \text{ \AA}$, характеризуется высокой плотностью и однородной зёрненной структурой.

12. Аномалии, наблюдаемые на зависимостях $\epsilon'/\epsilon_0(T, f)$ и $\epsilon''/\epsilon_0(T, f)$ керамики состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, обусловлены двумя релаксационными процессами: фазовым переходом из состояния сегнетоэлектрика–релаксора в параэлектрическое в диапазоне температур от 373 К до 523 К и проявлением поляризации Максвелла–Вагнера и соответствующей ей диэлектрической релаксации в диапазоне температур от 523 К до 873 К.

13. Керамика состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ при температурах ниже 473 К сочетает в себе сегнетоэлектрические и антиферромагнитные свойства, а также обладает магнитодиэлектрическим эффектом. Воздействие постоянного магнитного поля на керамику состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ приводит к изменению её диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 в зависимости от температуры: в диапазоне температур от 343 К до 423 К наблюдается положительный магнитодиэлектрический эффект, а в диапазоне от 423 К до 473 К — отрицательный магнитодиэлектрический эффект. Последнее объясняется смещением максимума T_{m1} диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 керамики состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ в сторону более низких температур под воздействием магнитного поля.

14. Плёнки состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, выращенные на подложках SrTiO₃/Si (001) и не содержащие примесей, однофазны и обладают поликристаллической структурой с параметрами элементарной ячейки $a = 3.995 \text{ \AA}$ и $c = 4.005 \text{ \AA}$, определёнными в тетрагональном приближении, что

указывает на незначительное искажение элементарной ячейки, вызванное различиями в параметрах элементарных ячеек плёнки и подложки.

15. Из данных спектрально-эллипсометрических измерений при комнатной температуре плёнок состава $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ на подложках SrTiO_3/Si (001) определены дисперсионные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции слоёв гетероструктуры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Superior Energy Density Achieved in Unfilled Tungsten Bronze Ferroelectrics via Multiscale Regulation Strategy / H. Peng, Z. Liu, Z. Fu [et al.] // *Advanced Science*. – 2023. – Vol. 10. – No. 17. – P. 2300227.
2. Homogeneous/Inhomogeneous-Structured Dielectrics and their Energy-Storage Performances / Z. Yao, Z. Song, H. Hao [et al.] // *Advanced Materials*. – 2017. – Vol. 29. – No. 20. – P. 1601727.
3. Optimizing high-temperature energy storage in tungsten bronze-structured ceramics via high-entropy strategy and bandgap engineering / Y. Gao, Z. Song, H. Hu [et al.] // *Nature Communications*. – 2024. – Vol. 15. – No. 1. – P. 5869.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

A1. Жидель, К. М. Оптические характеристики тонких пленок ниобата бария-стронция в зависимости от температуры / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Оптика и спектроскопия*. – 2025. – Т. 133, № 4. – С. 343-348. – DOI 10.61011/OS.2025.04.60529.7251-24. **K1**

A2. Phase transformations and properties of thin barium neodymium ferroniobate films in the temperature range from -190 to 200°C / A. V. Pavlenko, D. V. Stryukov, K. M. Zhidel', Y. Y. Matyash // *Inorganic Materials*. – 2022. – Vol. 58, № 10. – P. 1051-1057. – DOI 10.1134/S0020168522100107. (*Русскоязычная версия*: Фазовые превращения и свойства тонких пленок феррониобата бария-неодима в интервале температур $-190\dots 200^\circ\text{C}$ / А. В. Павленко, Д. В. Стрюков, К. М. Жидель, Я. Ю. Матяш // *Неорганические материалы*. – 2022. – Т. 58, № 10. – С. 1087-1093. – DOI 10.31857/S0002337X22100104). **K1**

A3. Structural characteristics of $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ thin films grown by RF-cathode sputtering / A. V. Pavlenko, D. V. Stryukov, L. I. Ivleva [et al.] // *Physics of the Solid State*. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 286-290. – DOI [10.1134/S1063783421020219](https://doi.org/10.1134/S1063783421020219). (*Русскоязычная версия*: Структурные характеристики выращенных методом RF-катодного напыления тонких пленок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}(001)$ / А. В. Павленко, Д. В. Стрюков, Л. И. Ивлева [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 250-254. – DOI [10.21883/FTT.2021.02.50473.174](https://doi.org/10.21883/FTT.2021.02.50473.174)). **K1**

A4. Жидель, К. М. Исследование структуры и свойств нанокompозитных пленок SrTiO_3 на подложках Si (001) / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2021. – № 4(164). – С. 30-34. – DOI 10.52190/2073-2562_2021_4_30. **K2**

A5. Pavlenko, A. V. $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ multiferroic ceramic: structure, dielectric and magnetodielectric properties / A. V. Pavlenko, K. M. Zhidel, L. A. Shilkina // *Physics of the Solid State*. – 2020. – Vol. 62, No. 10. – P. 1880-1885. – DOI [10.1134/S1063783420100248](https://doi.org/10.1134/S1063783420100248). (*Русскоязычная версия*: Павленко А. В. Структура, диэлектрические и магнитодиэлектрические свойства керамики мультиферроика $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ / А. В. Павленко, К. М. Жидель, Л. А. Шилкина // *Физика твердого тела*. – 2020. – Т. 62, № 10. – С. 1677-1682. – DOI [10.21883/FTT.2020.10.49918.117](https://doi.org/10.21883/FTT.2020.10.49918.117)). **K1**

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

A6. Zhidel, K. M. Preparation and properties of $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ ceramics and polycrystalline films / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // *Journal of Advanced Dielectrics*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 2160002. – DOI 10.1142/S2010135X2160002X. **Q2 (K1)**

A7. Zhidel, K. M. Structure and optical properties of STO/Si and $\text{BFO-PFN}/\text{STO}/\text{Si}$ heterostructures obtained by RF-cathode sputtering / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // *Ferroelectrics*. – 2022. – Vol. 590, No. 1. – P. 180-187. – DOI 10.1080/00150193.2022.2037949. **Q4 (K3)**

A8. High-temperature $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ multiferroic: microstructure, ferroelectric properties, and Mössbauer effect / A. V. Pavlenko, K. M. Zhidel, S. P. Kubrin, T. A. Kolesnikova // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, No. 15. – P. 21167-21174. – DOI [10.1016/j.ceramint.2021.04.120](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.120). **Q1 (K1)**

A9. Ferroelectric and magnetic properties of $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ ceramics / K. M. Zhidel, I. A. Verbenko, Y. S. Koshkid'ko, A. V. Pavlenko // *Ferroelectrics*. – 2021. – Vol. 576, No. 1. – P. 163-170. – DOI [10.1080/00150193.2021.1888275](https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1888275). **Q4 (K3)**

Публикации в сборниках трудов конференций

A10. Жидель, К. М. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны пленок SBN-61 от температуры / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXX международной конференции, Краснодар, 2-4 декабря 2024 года*. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2024. – С. 103-107.

A11. Zhidel, K. M. Synthesis, grain structure, and properties of the $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ solid solution / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications, 2021-2022: [selected reports of the 10th Anniversary International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2021 – 2022), which took place in Divnomorsk, Russia, May 23 – 27, 2022]* / Ivan A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, Arkady N. Soloviev (Eds.). – New York: Nova Science Publishers, 2023. – Ch. 2. – P. 11-18. – (Series: Materials Science and Technologies). – DOI [10.52305/QLWW2709](https://doi.org/10.52305/QLWW2709).

A12. Zhidel, K. M. SBN-61 barium strontium niobate films: investigation of optical anisotropy and surface morphology / K. M. Zhidel, Y. Y. Matyash, A. V. Pavlenko // *Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (Анализ современного состояния и перспективы развития): труды Двенадцатого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, Ростов-на-Дону, 26–28 декабря 2023 года: в двух томах. Т. 1*. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. – P. 233-237. – Режим доступа: https://lfpm.sfedu.ru/Files/2023/LFPM-2023_Proceedings_V1.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A13. Жидель, К. М. Анализ оптических параметров тонких пленок ниобатов бария-стронция состава SBN-61 / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Инновационные материалы и технологии – 2022: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, г. Минск, Республика Беларусь, 23–24 марта 2022 г.* – Минск: БГТУ, 2022. – С. 67-70.

A14. Жидель, К. М. Расчет толщины и оптических констант тонких пленок по спектрам пропускания / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. – 2021. – № 5(47). – С. 77-82.

A15. Жидель, К. М. Исследование оптических свойств пленок титаната стронция, выращенных на кремниевых подложках / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения: сборник трудов III молодежной всероссийской с международным участием научной конференции, посвященной 20-летию Факультета высоких технологий, 20-23 сентября 2021 г., г. Ростов-на-Дону*. – Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2021. – С. 172-176. – Режим доступа: https://piezoconf.ivtipt.ru/storage/app/media/2021_APPP_3_Proceedings.pdf (дата обращения 18.08.2025).

A16. Жидель, К. М. Исследование оптических свойств тонких пленок ВFO-PFN на p-Si / К. М. Жидель // XVIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (с международным участием), 30 ноября - 03 декабря 2021 г.: сборник трудов конференции. – Москва: ИМЕТ РАН, 2021. – С. 331-332.

A17. Жидель, К. М. SrTiO₃/Si как псевдоподложка для роста функциональных материалов / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXVII Международной научной конференции, Краснодар, 26 сентября – 2 октября 2021 г.* – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2021. – С. 55-58.

A18. Жидель, К. М. Наноразмерные пленки на базе мультиферроиков Ba₂NdFeNb₄O₁₅ со структурой тетрагональных вольфрамовых бронз: получение и структура / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Биохимическая физика: труды XX ежегодной молодежной конференции с международным участием ИБХФ РАН-вузы и IV симпозиума «Современное материаловедение»*, Москва, 16-17 ноября 2020 г. – Москва: РУДН, 2021. – С. 66-68.

A19. Оптические свойства и особенности сегнетоэлектрического отклика в тонких пленках титаната стронция, выращенных на подложках Si(001) / С. В. Бирюков, К. М. Жидель, А. В. Павленко, П. В. Попов // *Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (Анализ современного состояния и перспективы развития): труды Десятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, г. Ростов-на-Дону, 27-28 декабря 2021 года: [в 2 т.]. Т. 2*. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2021. – С. 51-54. – Режим доступа: https://lfpm.sfedu.ru/Files/2021/LFPM-2021_Proceedings_V2.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A20. Жидель, К. М. Зеренная структура и магнитоэлектрический эффект в мультиферроике $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ при комнатной температуре / К. М. Жидель, А. В. Павленко // *Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (Анализ современного состояния и*

перспективы развития): труды Десятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума, г. Ростов-на-Дону, 27-28 декабря 2021 года: [в 2 т.]. Т. 2. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2021. – С. 55-57. – Режим доступа: https://lfpm.sfedu.ru/Files/2021/LFPM-2021_Proceedings_V2.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A21. Структурные особенности и диэлектрические свойства тонких пленок сегнетоэлектрика-релаксора SBN-61 / А. В. Павленко, Д. В. Стрюков, Л. И. Ивлева [и др.] // Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXVI международной конференции / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кубанский государственный университет [и др.]; под научной редакцией В. А. Исаева, А. В. Лебедева. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2020. – С. 307-309.

A22. Получение и структура тонких пленок мультиферроиков $Ba_2NdFeNb_4O_{15}$ со структурой тетрагональной вольфрамовой бронзы, полученных методом RF-катодного распыления / К. М. Жидель, Д. В. Стрюков, А. В. Павленко, А. В. Назаренко // Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Моделирование эко-систем (Анализ современного состояния и перспективы развития): сборник трудов Девятого Международного междисциплинарного молодежного симпозиума (Ростов-на-Дону, 28–30 декабря 2020 г.): в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – С. 52-58. – Режим доступа: https://lfpm.sfedu.ru/Files/2020/LFPM-2020_Proceedings_V1.pdf (дата обращения 30.07.2025).

Свидетельство

A23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681136 Российская Федерация. Программа для записи и расчета диэлектрических параметров гетероструктур в зависимости от времени с использованием измерителя LCR Agilent E4980A: № 2021669667: заявл. 03.12.2021: опубл. 17.12.2021 / К. П. Андрушин, А. В. Павленко, И. Н. Андрушина, К. М. Жидель; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

Иные публикации (тезисы докладов на конференциях)

A24. Zhidel, K. M. Transmission Spectra of Barium-Strontium Niobate Films in a Wide Temperature Range / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // 2024 International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2024), Indore, India, November 6-11, 2024: Abstracts & Schedule / Institute of Engineering & Technology Devi Ahilya University Indore, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology; I. A. Parinov, N. Sohani, V. K. Gupta, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2024. – P. 348–349.

A25. Zhidel, K. M. Investigation of the Neodymium Barium Ferroniobate Films Optical Properties at High Temperatures / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // 2023 International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2023), Surabaya, Indonesia, October 3–8, 2023: Abstracts & Schedule / Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology; I. A. Parinov, E. P. Putri, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University, 2023. – P. 326-327.

A26. Жидель, К. М. Исследование анизотропии в пленках $Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb_2O_6$ / К. М. Жидель, А. В. Павленко // ВНКСФ – 26.2. Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных: материалы конференции: информационный бюллетень: в 2 т. Т. 2. – Екатеринбург; Ростов-на-Дону; Уфа: АСФ России, 2022. – С. 20. – Режим доступа: <http://asf.ural.ru/VNKSF/Tezis/v26.2/VNKSF-26-2-02.pdf> (дата обращения 30.07.2025).

A27. Жидель, К. М. Релаксорное поведение керамики твердых растворов 0.5BFO-0.5PFN / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», Москва 23-27 ноября 2020 г.: сборник материалов: [в 2 т.]. Т. 2: Секция 5 «Неорганические функциональные материалы». Секция 6 «Органические функциональные материалы». Секция 7 «Перспективные процессы в металлургии». Секция 8 «Материалы и технологии для зеленой химии». Секция 9 «Аддитивные технологии». Секция 10 «Здоровьесбережение населения: управленческие технологии». Секция 11 «Новые материалы и технологии в нефтегазовой промышленности. Газ, нефть, энергетика». Секция 12 «Материалы и технологии для сельского хозяйства» – Москва: Центр научно-технических решений (АНО ЦНТР), 2020. – С. 97-100.

A28. Жидель, К. М. Изучение спектров пропускания пленок BNFNO при различных температурах / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Материалы научных мероприятий Всероссийской конференции с международным участием «Угрозы и риски на Юге России в условиях геополитического кризиса», г. Ростов-на-Дону, 15-18 марта, 26-29 апреля 2023 г.: материалы докладов; XIX Ежегодной молодежной научной конференции «Достижения и перспективы научных исследований молодых ученых Юга России», г. Ростов-на-Дону, 17-28 апреля 2023 г.: тезисы докладов / Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Российский центр научной информации; редколлегия: академик Г. Г. Матишов (гл. редактор) [и др.]. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2023. – С. 229. – Режим доступа: https://www.ssc-ras.ru/uploads/files/2023/04/28/Konf_mol_Sborn_2023.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A29. Zhidel, K. M. Temperature dependences study of the SBN61 films transmission spectra / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // International Conference «Materials Science and Nanotechnologies», Ekaterinburg, Russia 27-30 August 2023: Abstract Book. – Ekaterinburg: Ural Federal University, 2023. – P. 172. – Режим доступа: https://nanocenter.urfu.ru/sites/default/files/MSN-2023_Abstract_book.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A30. Zhidel, K. M. Optical properties of the BNFNO films depending on temperature / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // International Conference «Materials Science and Nanotechnologies», Ekaterinburg, Russia 27-30 August 2023: Abstract Book. – Ekaterinburg: Ural Federal University, 2023. – P. 173. – Режим доступа: https://nanocenter.urfu.ru/sites/default/files/MSN-2023_Abstract_book.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A31. Жидель, К. М. Исследование оптических свойств пленок на основе феррита висмута и ферро-ниобата свинца / К. М. Жидель // Студенческая научная весна-2022: сборник тезисов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 4-8 апреля 2022 г. / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Волгоградский инженерно-технический институт. – Москва: НИЯУ «МИФИ»; Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 110-111. – Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/sbornik_sv-2022_rinc.pdf?ysclid=lycxst6kao981036265 (дата обращения 30.07.2025).

A32. Жидель, К. М. Изучение пленок феррониобата бария-неодима методом спектральной эллипсометрии / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели», 18–20 октября 2022 г., Москва: тезисы докладов. – Москва: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2022. – С. 57-58. – DOI 10.24412/cl-35673-2022-1-57-58.

A33. Zhidel, K. M. $\text{Sr}_{0,61}\text{Ba}_{0,39}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{MgO}$ (001) film: determination of the refractive index and thickness from the transmission spectrum / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // MSF'2022. Materials science of the future: research, development, scientific training, 5-7 April, 2022, Nizhny Novgorod, Russia: Abstracts. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod University Press, 2022. – P. 40.

A34. Жидель, К. М. Получение гетероструктур STO/Si и BFO-PFN/STO/Si / К. М. Жидель // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2022»: [XXIX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых], 12-22 апреля 2022 года, г. Москва. Секция «Физика». Подсекция «Физика твердого тела» / отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. – Москва: МАКС Пресс, 2022. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2022/data/25754/uid567761_4f772a8de7e0c73996d812e1fcd305880caaa5d3.doc (дата обращения 30.07.2025).

A35. Жидель, К. М. Исследование оптических свойств пленок феррониобата бария-неодима спектрофотометрическим методом / К. М. Жидель, А. В. Павленко // IV семинар «Современные нанотехнологии», IWMN-2022, 24-27 августа 2022, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия: сборник тезисов. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2022. – С. 148. – Режим доступа: https://nanocenter.urfu.ru/sites/default/files/Abstract_book_IWMN-2022.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A36. Жидель, К. М. Изучение спектров пропускания пленок BNFNO в видимом диапазоне / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXVIII международной конференции, [Краснодар, 3-7 октября 2022 г.] / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кубанский государственный университет, Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова; под научной редакцией В. А. Исаева, С. А. Аванесова, А. В. Лебедева. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2022. – С. 150-152. – Режим доступа: <https://ockc.kubsu.ru/data/ockc-2022.pdf> (дата обращения 30.07.2025).

A37. Жидель, К. М. Влияние катионов неодима на оптические свойства пленок на основе феррониобата бария / К. М. Жидель, А. В. Павленко // 2-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н. П. Сажина, (РЕДМЕТ-2022), Москва, 23-25 ноября 2022 г.: сборник тезисов. – Москва: Гиредмет, 2022. – С. 199-200.

A38. Zhidel, K. M. Dielectric and optical properties of polycrystalline SrTiO_3 thin films / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // 10th Anniversary International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2021–2022), Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022: Abstracts & Schedule / Don State Technical University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology; I.A. Parinov, A. N. Soloviev, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2022. – P. 343.

A39. Zhidel, K. M. (1-x)BFO-xPFN Ceramics System: Features of Dielectric Properties / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // 10th Anniversary International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2021–2022), Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022: Abstracts & Schedule / Don State Technical University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology; I.A. Parinov, A. N. Soloviev, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2022. – P. 343-344.

A40. Жидель, К. М. Применение метода спектральной эллипсометрии для характеристики наноразмерных пленок / К. М. Жидель // Наука и технологии Юга России: XVII Ежегодная молодежная научная конференция, г. Ростов-на-Дону, 15–30 апреля 2021 г.: тезисы докладов. – Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2021. – С. 225. – Режим доступа: https://www.ssc-ras.ru/ckfinder/userfiles/files/Sbornik_BK_2021_.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A41. Zhidel, K. M. Dielectric, Piezoelectric and Magnetodielectric Characteristics of Ceramic Multiferroic Solid Solution Composition $0.5\text{BiFeO}_3 - 0.5\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ / K. M. Zhidel, A. V. Pavlenko // 2020 International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2020), Kitakyushu, Japan, March 26–29, 2021: Abstracts & Schedule / Kyushu Institute of Technology, Southern Federal University, National Kaohsiung

University of Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University ; I. A. Parinov, Y.-H. Kim, N.-A. Noda, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2021. – P. 312-313. – Режим доступа: https://phenma2020.sfedu.ru/files/PHENMA2020_Int_Conference_Abstracts_%20Schedule.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A42. Жидель, К. М. Получение и свойства мультиферроика $0.5\text{BFO}-0.5\text{PFN}$ / К. М. Жидель, А. В. Павленко // XXII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXII), 25-28 августа 2021, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия: сборник тезисов. – Екатеринбург, Уральский федеральный университет, 2021. – С. 196. – Режим доступа: https://nanocenter.urfu.ru/sites/default/files/Abstract_book_VKS-XXII.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A43. Жидель, К. М. Тонкие пленки на базе мультиферроика $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ со структурой тетрагональных вольфрамовых бронз / К. М. Жидель // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ–2021»: [XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных], 12-23 апреля 2021 года, г. Москва. Секция «Физика». Подсекция «Физика твердого тела»/ отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. – Москва: МАКС Пресс, 2021. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22395/uid567761_3cc377eccdf9ee6dd7aa137711292de63e9958a0.doc (дата обращения 30.07.2025).

A44. Жидель, К. М. Получение и диэлектрическая релаксация в керамике $\text{Ba}_2\text{LnFeNb}_4\text{O}_{15}$ ($\text{Ln}=\text{Nd}$) / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н.П. Сажина (Сажинские чтения) (РедМет-2021), Москва. 9-10 декабря 2021 г.: сборник тезисов. – Москва: Гиредмет, 2021. – С. 160.

A45. Жидель, К. М. Тонкие пленки на основе SBN_x со структурой тетрагональных вольфрамовых бронз / К. М. Жидель, А. В. Павленко // XIX Всероссийская молодежная научная конференция «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение»: посвящённая 110-летию со дня рождения д.х.н., проф. А. А. Аппена, Санкт-Петербург, 1-3 декабря 2020 г.: сборник тезисов / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук. – Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2020. – С. 220-221.

A46. Жидель, К. М. Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства керамики мультиферроика $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Научные чтения им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», 17-18 сентября 2020 г.: программа: сборник материалов. – Москва: ИМЕТ РАН, 2020. – С. 119-120. – Режим доступа: http://files.imetran.ru/2020/Oding/Programm_Digest.pdf (дата обращения 30.07.2025).

A47. Жидель, К. М. Перспективы разработки технологии получения гетероструктур на основе сегнето-(магнито-)активных материалов со структурой ТВБ / К. М. Жидель, А. В. Павленко // Химия, физика, биология: пути интеграции: VIII Всероссийская научная молодежная школа-конференция, 22-24 апреля 2020 года: сборник тезисов докладов / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН). – Москва: СМУ ФИЦ ХФ РАН, 2020. – С. 49.

A48. Жидель, К. М. Диэлектрические характеристики и магнитодиэлектрический эффект в керамике $0.5\text{BiFeO}_3-0.5\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ / К. М. Жидель, Л.А. Шилкина, А. В. Павленко // Исследование сегнетоэлектрических материалов российскими учеными. Столетие открытия сегнетоэлектричества (СЭ-100): международная онлайн-конференция, Екатеринбург, 17-19 августа 2020: сборник тезисов конференции. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2020. – С. 127. – Режим доступа: https://nanocenter.urfu.ru/sites/default/files/Abstract_book_SE-100.pdf (дата обращения 30.07.2025).

Результаты диссертационного исследования были интегрированы в реализацию следующих проектов: государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ), FENW-2020-0032, 0852-2020-0032); гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10180), и получили финансовую поддержку ряда престижных стипендий, включая стипендии Правительства РФ, Президента РФ и «Умную стипендию» от банка «Центр-инвест».