

ОТЗЫВ

официального оппонента **Тумаркина** Андрея Вилевича

на диссертационную работу Жидель Марины Михайловны

«Керамика и тонкие плёнки активных материалов со структурами типа тетрагональной вольфрамовой бронзы и перовскита: особенности наностроения, диэлектрические и оптические свойства», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Многокомпонентные материалы, проявляющие высокую чувствительность к внешним воздействиям, такие как сегнетоэлектрики и мультиферроики, являются перспективными материалами современной электроники и фотоники. На их основе может быть реализован целый спектр функциональных приборов, от сенсоров до оптических устройств и фазированных антенных решеток. К данным материалам предъявляется широкий ряд требований, а именно: высокая чувствительность к внешнему электрическому или магнитному полю, диэлектрическая нелинейность, определенный уровень потерь, температурная стабильность свойств и тд. Все это многообразие требований делает актуальными задачи характеристики свойств данных материалов, существенно зависящих как от температуры и химического состава, так и от твердотельного состояния. Из-за многофакторной взаимосвязи структурных и физических свойств определение параметров подобных материалов является нетривиальной задачей. Именно поэтому установление закономерностей формирования фазового состава, структуры, диэлектрических и оптических свойств керамических и пленочных функциональных материалов со структурой типа вольфрамовой бронзы и перовскита является важнейшей задачей на пути создания эффективных электронных и оптических устройств. Всё это подчёркивает **актуальность** исследований автора. Диссертация Жидель К. М. представляет собой актуальное исследование в областях физики конденсированного состояния и материаловедения. Исследование материалов, которые могут быть реализованы на основе отечественных технологий, как это заявлено в работе, имеет не только научное, но и прикладное значение.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается адекватным использованием различных экспериментальных и теоретических методов исследования, согласованностью данных, полученных независимыми методами, соответствием полученных значений ряда величин с данными из литературных источников, а также уровнем журналов, в которых опубликованы работы автора. Методы изготовления объектов и измерения их характеристик соответствуют современным общепринятым стандартам. Выводы работы базируются на солидном массиве экспериментальных данных, полученных для статистически значимого количества образцов.

Научная новизна полученных результатов заключается в получении пленочных материалов $Ba_2NdFeNb_4O_{15}$ и $Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb_2O_6$ с высокой температурной стабильностью оптических параметров в диапазоне температур (299...453 К), рекордно низкой сегнетоэлектрической усталостью ($< 10^9$ циклов) и высокой энергоэффективностью ($\eta > 76-81\%$) плёнок $Ba_2NdFeNb_4O_{15}$, что демонстрирует высокую надёжность и долговечность созданных гетероструктур и указывает на перспективность их использования. Сильными сторонами работы являются широта охвата изучаемых активных материалов в различных твердотельных состояниях, комплексность применяемых методов исследования и успешная проработка методического подхода для исследования температурно-зависимых оптических свойств материалов на базе серийного отечественного оборудования.

Практическая значимость работы определяется, в том числе, применением результатов исследования в рамках нескольких научных проектов. Полученные результаты и установленные корреляции между составом, структурой и свойствами материалов имеют важное значение для развития физического материаловедения, создавая хорошую научную основу для прогнозирования физических свойств функциональных материалов, разработки методов управления их характеристиками и отдельными свойствами, которые могут быть использованы при создании элементной базы для новых отечественных оптических и электронных устройств.

Исследование выполнено на высоком уровне, что подтверждается количеством и качеством публикаций автора. По теме диссертации опубликовано 47 работ, из которых четыре статьи в журналах, включённых в базы Scopus и Web

of Science, пять — в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 38 работ — в сборниках трудов конференций, индексируемых в БД РИНЦ. Получено свидетельство регистрации программы для ЭВМ.

Задачи, поставленные в работе, решены, цель достигнута.

Диссертация Жидель Карины Михайловны **структурирована** логично и последовательно, состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений, изложенных на 205 страницах. Диссертационная работа написана логичным, доступным для понимания языком.

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

В **первом разделе** приведен обзор исследований активных материалов на основе сегнетоэлектриков и мультиферроиков с структурами типа тетрагональной вольфрамовой бронзы ($Ba_2LnFeNb_4O_{15}$, $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$) и перовскита ($(1-x)BiFeO_3-xPb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$). Рассмотрены перспективы их применения в современной технике в виде керамики, монокристаллов и тонких плёнок.

Во **втором разделе** рассматриваются методы получения и исследования экспериментальных образцов. Описаны синтез керамических материалов, методы получения тонких плёнок и применяемые измерительные приборы для изучения физических свойств образцов.

В **третьем разделе** рассмотрены свойства керамики и тонких плёнок $Ba_2NdFeNb_4O_{15}$, включая структурные, диэлектрические, сегнето- и пьезоэлектрические характеристики. Изучены фазовые переходы и оптические свойства гетероструктур, определены дисперсии оптических параметров. Спектрофотометрия подтвердила стабильность оптических свойств при изменении температуры, а спектральная эллипсометрия показала изотропность плёнки и отсутствие переходных слоев на границах раздела плёнка-подложка. Результаты указывают на потенциал применения этих материалов в энергоэффективных устройствах.

Четвёртый раздел посвящён исследованию тонких плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Описаны их структурные, диэлектрические, сегнетоэлектрические и оптические свойства. Рентгенодифракционный анализ показал монокристалличность и эпитаксиальный рост плёнок. Диэлектрические свойства плёнок $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ характерны для сегнетоэлектриков-релаксоров. Спектральная эллипсометрия выявила отсутствие влияния ориентационных блоков на оптические характеристики. Анализ спектров пропускания при изменении температуры позволил оценить изменение оптических свойств. Результаты открывают перспективы использования сегнетоэлектрических материалов в оптоэлектронике.

В пятом разделе представлены результаты исследований керамики и тонких поликристаллических плёнок $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$. Изучены их структурные, наноструктурные, диэлектрические, сегнетоэлектрические, магнитодиэлектрические, магнитные и оптические свойства. Впервые получены гетероструктуры на основе тонких плёнок $0.5\text{BiFeO}_3\text{--}0.5\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$, изучены их наноструктурные и оптические свойства. Результаты важны для создания новых функциональных материалов с заданными характеристиками.

В Заключение сформулированы основные **результаты и выводы**, полученные в работе.

Замечания по диссертационной работе:

1. В тексте диссертации недостаточно полно обоснован выбор материалов для исследования. Отсутствует сравнение исследуемых материалов с другими оксидными сегнетоэлектриками и твердыми растворами, на основании которого можно сделать вывод об их перспективности для тех или иных применений. Также уместно было бы обозначить конкретные характеристики исследуемых материалов в цифровом выражении, на основании которых автор считает данные материалы перспективными для конденсаторов, солнечных батарей, оптических и сенсорных применений. Обозначение «целевых» характеристик материалов, как керамических, так и пленочных, и их сопоставление с полученными в работе данными помогло бы понять, приблизили ли полученные результаты практическое применение исследуемых в работе материалов.

2. В тексте работы не обоснован выбор подложек для получения тонкопленочных образцов. Пленки феррониобата бария-неодима и ниобата бария-

стронция осаждались на подложки чистого оксида магния, а также на MgO с подслоем платины. В случае BNFN пленок представлено сравнение структурных характеристик пленок на MgO и на MgO/Pt (рис. 3.8 и 3.21), из которого можно сделать вывод, что структурное качество пленки на платиновом подслое уступает качеству пленки на монокристалле. Однако, данная разница в структуре пленок и ее возможное влияние на исследуемые оптические и электрофизические свойства пленочного феррониобата бария-неодима в тексте не обсуждаются. Аналогичная ситуация наблюдается в случае пленок SBN на MgO и на MgO/Pt. Дифрактограммы пленок SBN на MgO/Pt в работе не представлены, что затрудняет оценку их структурного качества и, опять же, его влияния на свойства. Что касается пленок BF–PFN, то они, в отличие от BNFN и SBN пленок, выращивались на кремнии с подслоем титаната стронция, что вызывает дополнительные вопросы. Либо в работе решалась задача получения и исследования пленок твердого раствора феррита висмута и феррониобата свинца именно на кремнии, и тогда это стоило отдельно подчеркнуть во введении, либо данные пленки удалось получить только в многослойной структуре BF–PFN/STO/Si, и тогда возникает вопрос, почему для роста пленок BF–PFN не использовался подслоем титаната стронция на MgO?

3. Для полноценного понимания полученных результатов в работе не хватает информации о технологических параметрах получения пленок исследуемых материалов (температуры подложек, условия осаждения, газовая среда и тд.). Возникает вопрос: в работе обсуждаются физические свойства лучших, типичных или единичных пленок?

4. В тексте не обсуждаются технологические причины отклонения параметра элементарной ячейки пленочного феррониобата бария-неодима на подложке MgO/Pt относительно объемного материала на 1.35% (и относительно других работ), что приводит к проявлению сегнетоэлектрических свойств исследуемого материала при комнатной температуре. На этом факте строится второе научное положение, поэтому вопрос представляется важным. Было бы уместно привести данные о повторяемости и устойчивости эффекта.

5. При исследовании свойств пленок ниобата бария-стронция на подложках монокристаллического оксида магния делается вывод о формировании пленок по трехмерному механизму Фольмера–Вебера, при этом взаимосвязь механизма роста

и технологических условий получения пленок не обсуждается. Для других пленочных материалов, исследуемых в работе, информация о возможных механизмах формирования пленок в тексте диссертации не приводится.

6. В диссертации приведены значения параметров элементарной ячейки (например, $a = 12.477 \text{ \AA}$, $c = 3.923 \text{ \AA}$ для керамики $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$), но не указана погрешность их определения. Какова точность определения параметров решётки?

7. Автором констатируется высокая температурная стабильность оптических параметров плёнок в диапазоне температур от 299 К до 453 К. Было бы крайне интересно и информативно расширить исследования в область более низких (криогенных) температур для выявления возможных фазовых переходов или в область более высоких температур для оценки предела их стабильности.

8. Указано, что для определения толщин и оптических параметров исследуемых материалов использовалась спектральная эллипсометрия. Однако, для плёнок $\text{Ba}_2\text{NdFeNb}_4\text{O}_{15}$ и $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ основные дисперсионные зависимости получены из спектров пропускания.

9. В заключении по работе было бы уместно подвести общий итог о полноте решения поставленных задач и о перспективах дальнейшего развития тематики и использования полученных результатов.

Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Указанные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку диссертационной работы, направлены, скорее, на дальнейшее развитие представленной научной тематики и не подвергают сомнению научные положения, результаты и выводы.

Основные научные положения, выносимые соискателем на защиту, обладают всеми признаками научной новизны, доказательности и практической ценности. Основные результаты диссертационной работы Жидель К. М. отражены с достаточной полнотой в публикациях в рецензируемых журналах, соответствующих специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния, и трудах конференций, на которых проведена основательная апробация. Автореферат корректно отражает содержание диссертации, которая представляет собой серьёзную и законченную научно-квалификационную работу.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа «Керамика и тонкие плёнки активных материалов со структурами типа тетрагональной вольфрамовой бронзы и перовскита: особенности наностроения, диэлектрические и оптические свойства» полностью соответствует требованиям раздела 2 «Критерии, которым должны отвечать диссертации на соискание учёных степеней ЮФУ» действующего Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», утверждённого приказом № 66-ОД от 29.03.2024 г., а соискатель Жидель Карина Михайловна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.27.06 Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники), доцент, профессор кафедры физической электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, тел.: +7-952-379-22-07, E-mail: avtumarkin@etu.ru

« 8 » октября 2025 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
НАЧАЛЬНИК ОДС
Т.Л. РУСЯЕВА



Тумаркин Андрей Вилевич