

## ОТЗЫВ

*официального оппонента* на диссертационную работу

**Мойсы Максима Олеговича** «Кристаллическая, доменная структуры и сегнетоэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобатов натрия, калия с мультиферроиком ферритом висмута» представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Диссертация Мойсы Максима Олеговича посвящена комплексному исследованию новых экологически безопасных и мультифункциональных материалов для электронной техники на основе твёрдых растворов ниобатов натрия и калия. Работа сфокусирована на установлении фундаментальных взаимосвязей между химическим составом, условиями синтеза, внутренней структурой (кристаллической, доменной и зеренной) и физическими свойствами (сегнетоэлектрическими, диэлектрическими и магнитными) в двух перспективных системах: мультиферроичных твёрдых растворах  $(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3 - \text{BiFeO}_3$ , сочетающих сегнето- и ферромагнитные свойства, и трёхкомпонентных сегнетоэлектрических составах  $\text{NaNbO}_3 - \text{KNbO}_3 - \text{CdNb}_2\text{O}_6$ , направленных на улучшение пьезоэлектрических характеристик.

**Актуальность данного исследования** обусловлена следующими ключевыми вызовами современного материаловедения. Во-первых, это существует острая необходимость замены токсичных свинец содержащих материалов (например, широко распространённого цирконат-титаната свинца – ЦТС) на экологически чистые альтернативы. Ниобаты щелочных металлов, в частности ниобат калия натрия  $(\text{Na,K})\text{NbO}_3$ , рассматривают как наиболее перспективную бессвинцовую альтернативу ЦТС благодаря своим близким к нему пьезоэлектрическим свойствам. Во-вторых, растущие требования микроэлектроники, пьезотехники и медицинской аппаратуры диктуют необходимость создания материалов, совмещающих в одной структуре несколько разнородных функций. Это обуславливает интерес к мультиферроикам, таким как  $\text{BiFeO}_3$ , введение которого в состав ниобатов позволяет создавать материалы с принципиально новым набором физических свойств. Таким образом, работа направлена на решение фундаментальной научной задачи и одновременно отвечает на запросы практики по созданию материалов нового поколения, соответствующих принципам «зелёной» химии и технологий.

Достоверность полученных научных результатов и выводов в диссертации обеспечена применением современного технологического и измерительного оборудования, которое проходит регулярную метрологическую поверку, что гарантирует точность и воспроизводимость экспериментальных данных; использованием комплекса взаимодополняющих и хорошо апробированных методов исследования, включая рентгеноструктурный анализ, сканирующую электронную микроскопию, энергодисперсионную спектроскопию, диэлектрическую спектроскопию в широком диапазоне частот и температур, мёсбауэровскую спектроскопию и измерения сегнетоэлектрических петель гистерезиса; проведением исследований на большом количестве образцов с варьируемым составом и неоднократной проверкой воспроизводимости полученных результатов. Также надёжность выводов подтверждена их всесторонней апробацией: результаты работы были представлены на авторитетных

международных и всероссийских конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах высокого уровня.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что установленные в ней закономерности были использованы для разработки мультифункциональных материалов, эксплуатируемых в широких интервалах внешних воздействий, а также для создания запатентованного состава засыпки для спекания сегнетокерамического материала на основе ниобата натрия.

В диссертации получен **ряд новых научных результатов**, впервые показавших критическую зависимость фазообразования и макроскопических свойств от термодинамической предыстории синтеза в системах  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$  и  $(1-x-y)\text{NaNbO}_3-x\text{KNbO}_3-y\text{CdNb}_2\text{O}_6$ ; установлено отсутствие непрерывного ряда твёрдых растворов в первой системе с формированием областей несмешиваемости и обнаружены два релаксационных процесса недебаевского типа с энергиями активации 0,13-0,38 эВ; впервые определены оптимальные объёмные концентрации  $90^\circ$ -ных доменов, обеспечивающие полную релаксацию механических напряжений в гетерофазных системах, и методом Прейзаха выявлены характеристики доменного переключения, соответствующие сегнетожесткой керамике.

Структура диссертации логична и полностью отражает последовательность решения поставленных задач. **Диссертация** объемом 185 страниц состоит из введения, пяти основных разделов, заключения, списка литературы из 269 источников и двух приложений. **Введение** содержит обоснование актуальности темы, формулировку целей и задач исследования, описание объектов исследования, научной новизны и практической значимости полученных результатов. **Первый раздел** представляет собой литературный обзор современного состояния исследований в области бессвинцовой сегнето-пьезокерамики. Проведён анализ основных достижений и состояния перспективных направлений разработки экологически чистых функциональных материалов на основе ниобатов щелочных металлов и мультиферроиков. **Второй раздел** подробно описывает методы получения керамических образцов методом твердофазного синтеза и комплекс экспериментальных методик, использованных для исследования: рентгеноструктурный анализ; сканирующая электронная микроскопия энергодисперсионный анализ; Мёссбауэровская спектроскопия; диэлектрическая спектроскопия; теоретические модели (Гавриляка-Негами, Диссасдо-Хилла, Прейзаха). **Третий раздел** посвящен исследованию проблем изоморфизма и фазообразования в твёрдых растворах системы  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$ . Установлено отсутствие непрерывного ряда твёрдых растворов, выявлены области гомогенности и несмешиваемости, построены фазовые диаграммы. **Четвертый раздел** содержит результаты исследования дисперсионных и магнитных явлений в твёрдых растворах на основе ниобатов и феррита висмута. Обнаружены и изучены релаксационные процессы недебаевского типа, определены их энергии активации, исследованы особенности магнитных фазовых переходов. **Пятый раздел** представляет анализ формирования не- $180^\circ$  доменных структур и доменно-ориентационных процессов в трёхкомпонентной системе ниобатов. Определены оптимальные объёмные концентрации доменов для релаксации механических напряжений, исследованы пьезоэлектрические и поляризационные свойства. **В заключе-**

нии сформулированы основные научные результаты и выводы работы, подтверждающие достижение поставленных целей и решение задач исследования.

Наряду с несомненными научными достоинствами и практической значимостью работы в представленном исследовании можно выделить **некоторые аспекты**, требующие дополнительного пояснения.

1. **Постановка задач исследования.** Соискатель формулирует в качестве одной из задач «моделировать петли диэлектрического гистерезиса в материалах на основе ниобатов». Однако, в представленных к защите результатах и публикациях отсутствует описание самостоятельной разработанной физической или математической модели. Использование формализма Прейзаха для анализа экспериментальных данных является стандартным методом интерпретации, а не моделированием в строгом смысле этого слова. Таким образом, формулировка данной задачи, возможно, требует уточнения.

2. **Глубина исследования магнитных свойств.** В работе заявлено изучение мультиферроичных систем, однако магнитные свойства исследованы лишь мёсбауэровской спектроскопией, что позволило определить температуру Нееля и ширину магнитного перехода. Отсутствуют данные по намагниченности (полевые зависимости) и магнитному гистерезису, которые являются ключевыми для характеристики магнитного упорядочения и мультиферроического поведения. Это не позволяет в полной мере охарактеризовать магнитный отклик полученных материалов и сделать однозначные выводы о силе магнитоэлектрической связи.

3. **Сопоставление с известными аналогами.** В автореферате и диссертации следовало бы большее внимание уделить сравнительному анализу полученных результатов с данными по другим известным бессвинцовым сегнетоэлектрическим и мультиферроичным системам. Отсутствует комплексное обсуждение, в какой мере исследуемые материалы превосходят или уступают по ключевым параметрам (температура Кюри, коэрцитивное поле, пьезомодуль) существующим аналогам, что затрудняет оценку реального вклада работы в развитие материаловедения.

4. **Характеристика пьезоэлектрических свойств.** Несмотря на то, что работа позиционируется как исследование, в том числе, пьезоэлектрических свойств, в автореферате и основных публикациях не уделено достаточного внимания количественным данным по пьезомодулю ( $d_{33}$ ), электромеханическим коэффициентам или другим прямым пьезоэлектрическим характеристикам. Упоминание «пьезоактивности» без приведения конкретных цифр делает этот аспект работы декларативным и не позволяет сравнивать полученные материалы с известными аналогами.

5. **Интерпретация релаксационных процессов.** В работе идентифицированы два релаксационных процесса и предложены возможные механизмы их возникновения (перескоки поляронов, поляризация на границах кластеров). Однако, предлагаемые объяснения носят гипотетический характер и не подкреплены независимыми экспериментальными данными, например, импедансной спектроскопией на постоянном токе для изучения электропроводности или методами, напрямую подтверждающими существование кластеров предложенной природы. Это снижает степень доказательности сделанных выводов о физической природе релаксации.

Отмеченные замечания носят частный характер и не ставят под сомнение общую высокую оценку диссертационного исследования, его научную значимость, а

также достоверность и обоснованность основных результатов и выводов, представленных к защите.

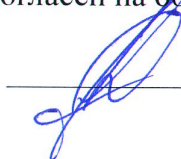
### **Заключение о соответствии диссертации установленным критериям**

Основные научные положения и выводы обоснованы, достоверны и имеют практическую и научную значимость. В публикациях с достаточной полнотой отражены основные результаты диссертационной работы. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Диссертация «Кристаллическая, доменная структуры и сегнетоэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобатов натрия, калия с мультиферроиком ферритом висмута» является завершенной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям, предусмотренным пунктами 2.1 - 2.4, предъявленным к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук действующего «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», утвержденного Приказом № 66-ОД от 29.03.2025», а ее автор – Мойса Максим Олегович – заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

«7» сентября 2025 г.

Согласен на обработку моих персональных данных



Винник Денис Александрович  
доктор химических наук  
(02.00.04 – физическая химия),  
профессор, профессор РАН,

Южно-Уральский государственный университет, НИИ перспективных материалов и технологий ресурсосбережения, директор

**официальный оппонент**

Индекс, почтовый адрес места работы: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Рабочий e-mail, рабочий телефон: vinnikda@susu.ru; +7(351) 272-35-55



ВЕРНО

Начальник службы  
делопроизводства ЮФУ  
Н.Е. Циуллина

