

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

Диссертационная работа Мойсы М.О. посвящена комплексному исследованию кристаллической, доменной структур и функциональных свойств многокомпонентных твёрдых растворов на основе ниобатов щелочных металлов и мультиферроика феррита висмута. Выбор объекта исследования обусловлен **актуальной проблемой** поиска и создания экологически безопасных бессвинцовых сегнето- и пьезоэлектрических материалов, способных заменить традиционные свинецсодержащие аналоги, такие как широко распространённая система ЦТС. Особый интерес представляет совмещение в одном материале сегнетоэлектрических и магнитных свойств, что открывает перспективы для создания мультифункциональных устройств. Работа полностью соответствует специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния», поскольку направлена на установление фундаментальных корреляционных связей «состав – структура – свойства» в сложных оксидных системах, являющихся классическими объектами физики конденсированного состояния.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов и выводов не вызывает сомнений и обеспечена комплексным подходом к исследованиям. Автор использовал современные и адекватные поставленным задачам методы: рентгеноструктурный анализ, сканирующую электронную микроскопию, энергодисперсионный анализ, диэлектрическую спектроскопию в широких частотном и температурном диапазонах, мессбауэровскую спектроскопию и методы измерения пьезоэлектрических характеристик. Большой объём экспериментальных данных, полученных на

сериях образцов с варьированием состава и термодинамической предыстории, их статистическая обработка, а также согласованность результатов, полученных различными независимыми методами, подтверждают их обоснованность. Качественный анализ релаксационных процессов с применением моделей Гавриляка–Негами и Диссадо–Хилла также укрепляет уверенность в достоверности интерпретации экспериментальных данных.

Практическая значимость работы заключается в непосредственном применении установленных закономерностей для разработки новых функциональных материалов. На основе проведённых исследований разработаны составы бессвинцовой сегнетокерамики, на которые получены патенты. Полученные материалы перспективны для использования в качестве пьезопреобразователей, датчиков, элементов устройств памяти и другой электронной техники, работающей в широких диапазонах температур и внешних полей, что соответствует стратегическому направлению импортозамещения и перехода на «зелёные» технологии.

В диссертации получен ряд **новых научных результатов**, которые выносятся на защиту. К ним следует отнести выявление локальных областей гомогенности и расслоения в системе $(1-x)(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$. Впервые установлена чёткая корреляция между дисперсией диэлектрических спектров и неоднородностью элементного состава твёрдых растворов. Для составов с высоким содержанием феррита висмута в области высоких температур обнаружены и детально охарактеризованы два релаксационных процесса недебаевского типа, и определена их энергия активации. Методами мессбауэровской спектроскопии показано подавление пространственной спиновой циклоиды в твёрдых растворах, что связано с совместным гетеровалентным замещением в катиодных подрешётках. Также проанализированы доменные структуры и релаксации механических напряжений в гетерофазных сегнетоэлектрических системах с неизоструктурными компонентами.

Структура диссертации логична и полностью отражает последовательность решения поставленных задач. **Диссертация состоит из** введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 269 источников и приложений. Работа изложена на 185 страницах, содержит 74 рисунка и 21 таблицу.

Во введении обосновывается актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обширный и глубокий аналитический обзор современного состояния исследований в области бесвинцовых сегнетоэлектриков и мультиферроиков, который демонстрирует свободное владение автором предметной областью. Приведены важные электрофизические характеристики титаната бария – сегнетоэлектрика, и его модификаций; ниобата натрия – калия и его модификаций, а также мультиферроиков на основе феррита висмута.

Вторая глава содержит подробное описание объектов исследования, методик их синтеза и комплексного исследования, что позволяет оценить воспроизводимость результатов. Автор работы использовал рентгенографические исследования методом порошковой дифракции. Микроструктура керамических образцов изучена с помощью растрового сканирующего электронного микроскопа. Семейство петель диэлектрического гистерезиса (P-E петли) получено посредством подачи синусоидального сигнала электрического поля на измерительном стенде STEP (схема Соьера-Тауэра). Исследования диэлектрических спектров проводились на неполяризованных образцах в диапазоне температур от 10 до 330 К с помощью прецизионного анализатора импеданса Wayne Kerr 6500 В.

Электрофизические параметры поляризованных образцов в диапазоне температур от 10 до 330 К измерялись с помощью прецизионных LCR

измерителей Agilent 4980A методом резонанса-антирезонанса. Мёссбауэровские спектры измерены с помощью спектрометра MS1104Em.

Приведен алгоритм Метра для анализа сосуществующих сегнетоэлектрических фаз и их доменных структур.

Третья глава посвящена анализу кристаллической структуры, построению фазовых диаграмм и исследованию микроструктуры твёрдых растворов. Данные рентгенофазового анализа квазибинарного разреза системы $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3 - x\text{BiFeO}_3$ позволили автору построить его фазовую диаграмму, установить область образования однородных твердых растворов. Показано, что вблизи крайних компонентов структуры ГР как по элементному составу, так и по зёрненному ландшафту наиболее однородны.

Четвёртая глава содержит обширный экспериментальный материал по диэлектрическим, релаксационным и магнитным свойствам. Установлена корреляция между дисперсией диэлектрических спектров и однородностью элементного состава твёрдых растворов системы $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3 - x\text{BiFeO}_3$. Обнаружено, что в указанных твёрдых растворах с $x = 0.85 \dots 0.95$ в интервале температур от 560 К до 720 К формируются два релаксационных процесса недебаевского типа.

Пятая глава анализирует доменную структуру и процессы переключения и сегнетоэлектрические свойства твёрдых растворов системы $(1-x-y)\text{NaNbO}_3 - x\text{KNbO}_3 - y\text{CdNb}_2\text{O}_6$.

Содержание глав взаимосвязано и подчинено общей цели работы.

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

Наряду с несомненными достоинствами, в работе можно выделить **ряд замечаний**, которые, однако, не умаляют её общей ценности:

1. **Интерпретация релаксационных процессов.** Физические механизмы выявленных релаксационных процессов, хотя и интерпретированы, могли бы быть раскрыты более глубоко, с привлечением дополнительных данных о дефектной структуре и проводимости.

2. **Представление пьезоэлектрических характеристик.** Данные по пьезоэлектрическим свойствам представлены не для всех составов и могли бы быть дополнены для более полной картины.

3. **Соотношение теории и эксперимента в анализе доменной структуры.** Теоретические расчёты матриц дисторсий в главе 5 могли бы быть усилены их сопоставлением с прямыми экспериментальными наблюдениями доменной структуры, например, методами просвечивающей электронной микроскопии.

4. **Проблема высокой электропроводности.** Отмечается проблема высокой электропроводности части образцов, не позволившая провести их поляризацию; целесообразно было бы обсудить потенциальные пути решения этой проблемы (например, легирование, модификация условий синтеза).

5. **Качество иллюстративных материалов.** Часть иллюстративных материалов (фазовые диаграммы, спектры) имеют низкое разрешение, что затрудняет их восприятие при чтении работы. Автор фактически изучает бинарный разрез системы $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3 - x\text{BiFeO}_3$, а приводит трехкомпонентную диаграмму, которая менее информативна в данном случае.

6. **Стилистические особенности:** встречаются длинные сложные предложения, затрудняющие восприятие; в некоторых местах наблюдается повторение одних и тех же формулировок (см. стр. 47).

7. **Форматирование и технические неточности:** в таблицах встречаются невыровненные столбцы и разрывы строк; в химических формулах имеются опечатки.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, ее научной значимости и не влияют на её основные результаты и выводы.

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.

« 6 » октября 2025 г.

Согласен на обработку моих персональных данных


Исаев Владислав Андреевич
доктор физико-математических наук
(01.04.07 – физика конденсированного состояния),

профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кубанский государственный университет»,
профессор кафедры теоретической физики и компьютерных технологий
e-mail: vlisaev@rambler.ru, телефон: +7 (918) 132-33-79

Почтовый адрес: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149

Подпись проф. Исаева В.А. заверяю:

Ученый секретарь совета университета ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный университет»

кандидат

филологических наук,

доцент

Тел. 8 (861) 219-95-31

Email: acad-secr@kubsu.ru




Е. М. Касьянова