

УТВЕРЖДАЮ

Ректор учреждения образования
«Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники»

В.А. Богуш

22 апреля 2026 г.



ОТЗЫВ

оппонирующей организации – учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», на диссертационную работу МАКОЕДА Игоря Ивановича «Спин-зарядовые упорядоченные состояния и магнитоэлектрические взаимодействия в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа И.И. Макоеда содержит результаты выполненного им синтеза, обширного экспериментального исследования и моделирования свойств мультиферроиков со структурой шпинели и перовскита, содержащих редкоземельные элементы. Они представляют фундаментальный научный интерес для понимания взаимосвязей особенностей строения этих материалов с их диэлектрическими, оптическими и магнитными свойствами, что актуально, в том числе, и для практического использования таких материалов в твердотельных приборах обработки информации, особенно в спинтронике.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и физико-математической отрасли наук. Область исследований соответствует п. 1 Методы получения, измерения параметров и модификации материалов (физические и технические аспекты), п. 2 Элементный и фазовый состав, структура (строение) и физические свойства конденсированных сред (систем), п. 10 Моделирование структуры и свойств конденсированных сред названного паспорта.

Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК. Текст диссертации включает введение, общую характеристику работы, обзорную главу, пять глав с материалами выполненного исследования, заключение, библиографический список использованных источников (215 наименований в библиографическом списке и 88 печатных работ автора, среди которых 2 монографии), приложение, в котором представлены справочные материалы, подтверждающие внедрение результатов исследования в образовательный процесс.

Общий объем диссертации 271 страница. Изложение результатов в диссертации и автореферате сделано на русском языке и исчерпывающе проиллюстрировано (183 рисунка в диссертации). Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание самой диссертации.

2. Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости

Научный вклад соискателя заключается в установлении фундаментальных закономерностей формирования и взаимодействия упорядоченных спиновых и зарядовых состояний в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита, содержащих редкоземельные элементы. К наиболее значимым результатам работы, отличающимся существенной научной новизной, следует отнести следующие:

1. Разработан и использован оригинальный метод синтеза твердых растворов перовскитов и шпинелей, содержащих редкоземельные элементы, сочетающий проведение твердофазных реакций и холодное прессованием исходных компонентов под давлением.

2. Обнаружены и исследованы корреляции структуры и диэлектрических свойств в катионзамещенных твердых растворах $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$. Установлено, что у этих материалов высокие значения действительных компонент диэлектрической проницаемости в низкочастотном диапазоне связаны с миграцией слабосвязанных носителей заряда и их накоплением на границах зерен, а изовалентное замещение катионов Bi^{3+} катионами редкоземельных элементов в феррите висмута приводит к подавлению пространственной спин-модулированной структуры и возникновению слабого ферромагнитного отклика, величина которого зависит от концентрации и типов замещающих катионов.

3. Впервые на основании результатов оценки величин термодинамических характеристик магнито- и электрокалорического эффектов в феррите висмута получены доказательства и сделаны выводы, позволившие отнести данное соединение к классу мультикалориков.

4. Впервые на основании анализа экспериментальных данных и результатов первопринципных расчетов зонной структуры, карт распределений электронной и спиновой плотностей $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$ определены особенности формирования полупроводникового состояния в этом материале, характеризуемого шириной запрещенной зоны 1,28 эВ, что является следствием взаимодействия сильнокоррелированных $3d$ -состояний электронов катионов железа и f -состояний электронов катионов самария.

5. Впервые первопринципными расчетами электронной структуры твердого раствора SmFeO_3 показана возможность индуцирования сегнетоэлектрического состояния в нем при температурах, ниже точки антиферромагнитного упорядочения магнитной подрешетки, образованной катионами самария, а в области высоких температур возможно образование областей со спонтанной электрической поляризацией при наличии дополнительных факторов, понижающих симметрию кристалла.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

1. Экспериментальные данные и результаты моделирования подтверждающие, что уменьшение радиуса редкоземельного иона (R) в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) со структурой перовскита приводит к увеличению в них анионной поляризуемости, снижению времени релаксации поляризации, увеличению действительной составляющей диэлектрической проницаемости в низкочастотном и высокочастотном диапазонах, росту диэлектрической проницаемости в области фундаментального поглощения и снижению ширины запрещенной зоны для прямых и непрямых оптических переходов, что важно при выборе оптимальных составов таких материалов для придания им требуемых диэлектрических и оптических свойств.

2. Модель, описывающая формы оптических и рамановских спектров твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) со структурой перовскита отличающаяся использованием аппроксимаций линейными относительно радиуса R-катиона функциями значений резонансных частот, сил осцилляторов и коэффициентов затухания, полученных экспериментально.

3. Экспериментальные данные и результаты моделирования, показывающие, что замещение ионов никеля ионами цинка в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0 - 1$) со структурой шпинели вызывает изменения величин эффективных зарядов и межионных расстояний Fe–O в окта- и тетраэдрических позициях элементарной ячейки таких твердых растворов, что приводит к уменьшению времени релаксации их диэлектрической поляризации и сопровождается увеличением низкочастотных значений действительной составляющей диэлектрической проницаемости и уменьшением ее значения в высокочастотном диапазоне, что контролируется поперечными оптическими фоновыми, связанными с колебаниями октаэдрических и тетраэдрических комплексов.

4. Экспериментальные данные и результаты моделирования, свидетельствующие о том, что уменьшение радиуса редкоземельного иона (R) в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) со структурой перовскита сопровождается уменьшением длин связей R–O, а также валентных углов Fe–O–Fe в $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{0,9}\text{Er}_{0,1}\text{FeO}_3$, что приводит к возрастанию величин коэрцитивных полей и остаточных удельных намагниченностей, уменьшению магнитоемкости и магнитоэлектрического коэффициента.

5. Экспериментальные данные и результаты моделирования, подтверждающие, что уменьшение радиуса редкоземельного иона (R) в твердых растворах $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) со структурой перовскита сопровождается уменьшением валентных углов Fe–O–Fe, что приводит к убыванию относительной мощности охлаждения, магнитной составляющей энтропии и удельной теплоемкости этих материалов и указывает

на возможность их практического использования в термомагнитных элементах защиты электрических цепей.

6. Экспериментальные данные и результаты моделирования, подтверждающие, что уменьшение радиуса редкоземельного иона (R) в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R = La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er) со структурой перовскита вызывает изменение длин межионных связей, структурные искажения, и наклоны кислородных октаэдров в них, что приводит к увеличению магнитной составляющей энтропии, удельной теплоемкости, относительной мощности охлаждения, указывая на возможность использования электро- и магнитокалорического эффектов в этих материалах при переходе «слабый ферромагнетик – парамагнетик».

Совокупность названных результатов является существенным вкладом в физику твердотельных магнитных материалов. Этот вклад можно квалифицировать как концептуальное развитие актуального научного направления – физика мультиферроиков со структурой шпинели и перовскита.

4. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Представленную к защите диссертацию отличает выбор актуального с научной точки зрения объекта исследования – мультиферроики со структурой перовскита и шпинели, обладающие перспективами для применения в твердотельных элементах оптической и магнитной обработки информации.

Обширный экспериментальный материал, полученный с использованием современных методов анализа твердых тел, его обстоятельный анализ и предложенные соискателем оригинальные модельные представления обладают новизной. Это подтверждают публикации соискателя в престижных международных научных журналах. Они признаны мировым научным сообществом и обеспечивают приоритет Республики Беларусь в синтезе и исследовании мультиферроиков со структурой шпинели и перовскита. В международную библиографическую базу научных публикаций Scholar Google (<https://scholar.google.com/citations?user=BC8Zg0cAAAAJ>) помещено 134 печатные работы соискателя, на которые сделано 663 ссылки, h-индекс составляет 13 (по состоянию на 17.04.2026).

Таким образом, полностью выполнены требования к докторским диссертациям, регламентированные п. 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Научная квалификация соискателя соответствует ученой степени доктора физико-математических наук.

5. Рекомендации по практическому применению результатов работы

Диссертация содержит результаты, носящие фундаментальный характер в области физики конденсированного состояния. Их применение ориентировано в первую очередь на практическое применение при решении актуальных задач материаловедения, при разработке и синтезе новых материалов для использования в качестве элементной базы электроники. Они могут быть использованы для дальнейших работ в области физики конденсированного

состояния, а также в учебном процессе при подготовке специалистов с высшим образованием в области микроэлектроники и спинтроники о чем свидетельствует приложенная к диссертации Справка о внедрении результатов работы в образовательный процесс Учреждения образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина».

Прикладной потенциал результатов диссертационного исследования состоит в возможности разрабатывать и изготавливать новые элементы обработки информации на предприятиях электронной промышленности Республики Беларусь, таких как ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «МНИИРМ».

6. Замечания по работе

6.1. В положениях, вынесенных на защиту, обнаруженные закономерности излишне подробно представлены количественными характеристиками в ущерб объяснению физической природы их возникновения, хотя в основной части автореферата и диссертации соответствующие модельные представления приводятся.

6.2. Полупроводниковые свойства ферритов висмута разного состава следовало бы подтвердить и измерением температурной зависимости их электрического сопротивления.

6.3. В разделе **Структура и объём диссертации** сначала указано, что в диссертации имеется два Приложения, а потом одно. Фактически их два, хотя они не пронумерованы.

6.4. В разделе **Личный вклад соискателя ученой степени** указано *“Автором самостоятельно проведен литературный и патентный поиск по теме исследования”*. Результаты патентного поиска в диссертации в явном виде обнаружить не удалось.

6.5. Не сформулировано новое научное направление или концептуальное развитие одного из актуальных научных направлений, которому посвящена диссертация, в соответствии с п. 21 Положения о присуждении ученых степеней и ученых званий. Наше предложение по этому вопросу представлено в п. 3 данного отзыва.

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы.

7. Заключение

Диссертация «Спин-зарядовые упорядоченные состояния и магнитоэлектрические взаимодействия в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, подготовлена на актуальную тему, содержит принципиально новые научные результаты и полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Ее автор – МАКОЕД Игорь Иванович, заслуживает присуждения искомой ученой степени по названной специальности за новые научно обоснованные результаты, отмеченные в п. 3 данного отзыва.

Согласно приказу ректора БГУИР от 16.04.2026 № 92-о данный отзыв рассмотрен и принят на расширенном заседании кафедры микро- и наноэлектроники 22 апреля 2026 года, протокол № 15, на котором соискатель И.И. Макоед выступил с докладом и квалифицированно ответил на заданные ему вопросы. В заседании участвовали 3 доктора наук, 5 кандидатов наук, а также другие сотрудники кафедры микро- и наноэлектроники и научно-исследовательской части БГУИР. Результаты открытого голосования участников заседания, имеющих ученые степени: «за» – 8, «против» – нет, «воздержался» – нет.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» дает согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на сайте Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению».

Председательствующий на заседании
заместитель заведующего кафедрой
микро- и наноэлектроники
кандидат технических наук, доцент

А.А. Степанов

Эксперт по диссертации
профессор кафедры микро- и наноэлектроники
доктор физико-математических наук, профессор

В.Е. Борисенко

Ученый секретарь на заседании
доцент кафедры микро- и наноэлектроники
кандидат технических наук, доцент

Д.А. Котов