

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ
НАУК БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»

Объект авторского права
УДК 537.9:538.91:537.622.5

МАКОЕД
Игорь Иванович

**СПИН-ЗАРЯДОВЫЕ УПОРЯДОЧЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ
И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В МУЛЬТИФЕРРОИКАХ СО СТРУКТУРОЙ
ШПИНЕЛИ И ПЕРОВСКИТА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск 2026

Работа выполнена в Учреждении образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»

Научный консультант **Анищик Виктор Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Кукарко Владимир Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, начальник Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Грабчиков Сергей Степанович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Рубаник Василий Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, заведующий лабораторией физики металлов Государственного научного учреждения «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится «30» апреля 2026 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.06.01 при Государственном научно-производственном объединении «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» по адресу: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 19. Тел. +375 (17) 275-13-13 (ученый секретарь совета), e-mail: ifttnanb@physics.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Автореферат разослан «27» марта 2026 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

Д. В. Карпинский

ВВЕДЕНИЕ

Развитие микро- и оптоэлектроники требует создания новых материалов с широким диапазоном физических свойств, на которых базируется материаловедение и приборостроение технического назначения. Актуальной является задача синтеза и изучения веществ с сильным взаимодействием магнитной и электрической подсистем, позволяющих создавать устройства на их основе, обладающие принципиально новыми функциональными возможностями. Центральное место в физике конденсированного состояния занимают задачи, связанные с усовершенствованием методик синтеза новых материалов, установлением корреляций между электронной и магнитной структурами, взаимодействие которых во многом определяет физические свойства материалов.

Мультиферроики – класс кристаллических твердых тел, в которых сосуществуют хотя бы два из трех параметров порядка: магнитного, электрического или механического. Связь между электрической и магнитной подсистемами (магнитоэлектрический эффект) дает возможность управлять магнитными свойствами мультиферроиков электрическим полем и, наоборот, изменять их электрические свойства в магнитном поле. Это определяет востребованность подобных материалов как объектов исследования для фундаментальной физики конденсированного состояния, а также их перспективность для различных практических применений.

Три класса кристаллических твердых тел: ферромагнетики, сегнетоэлектрики и сегнетоэластики, несмотря на разную природу происходящих в них структурных фазовых переходов, демонстрируют целый ряд сходных свойств: возникновение доменов, аномалии физических свойств в окрестности перехода, наличие гистерезиса. Данным материалам присущи как свойства, характерные для каждого из классов в отдельности (спонтанная намагниченность, магнитострикция, спонтанная поляризация и пьезоэлектрический эффект), так и совершенно новые свойства, связанные с взаимодействием магнитной и электрической подсистем: 1) магнитоэлектрический эффект (индуцированная магнитным полем электрическая поляризация и индуцированное электрическим полем намагниченность); 2) эффект магнитоэлектрического контроля (переключение спонтанной поляризации магнитным полем и спонтанной намагниченности электрическим полем); 3) магнитодиэлектрический эффект или «магнитоемкость» (изменение диэлектрической постоянной под действием магнитного поля).

Сведения о температурных и частотных зависимостях диэлектрических свойств мультиферроиков позволяют получить представление о величинах вкладов в диэлектрическую проницаемость, связанных с упругими смещениями атомных электронов и упругими колебаниями ионов около положения равновесия. Это позволяет создавать полуэмпирические модели расчетов соответствующих величин на основании заданного состава кристаллов и электронной структуры образующих их атомов. Постановка и

решение подобного рода задач актуальны и имеют важное практическое значение, в частности, при синтезе новых материалов с заданными свойствами. Представляет интерес решение задач физики прозрачности магнитных оксидов, теории взаимодействия их магнитной и электронной подсистем, изучение механизмов формирования диэлектрического отклика в различных частотных диапазонах.

Несмотря на большое число экспериментальных и теоретических исследований мультиферроиков, многие важные вопросы, связанные с физикой процессов, происходящих в таких материалах еще не решены. Поэтому актуальной является задача по обобщению и сопоставлению экспериментальных и теоретических результатов, относящихся к получению и исследованию мультиферроиков - перспективных материалов современной спинтроники. Общая черта, которая объединяет мультиферроики и материалы спинтроники, это взаимосвязь магнитных, электрических, оптических и других физических характеристик. Сложные магнитоупорядоченные оксиды переходных элементов типа шпинелей и перовскитов нашли широкое применение в различных областях автоматики и электронной техники. Первые использования ферритов вызваны необходимостью замены малоэффективных смесей магнитодиэлектриков в радиотехнике высоких частот. Здесь, главным образом, важны высокие значения магнитных характеристик изделий, составляющих элементную базу. Диэлектрические свойства чаще всего выступали как нежелательные проявления в виде паразитных межвитковых емкостей и дополнительных потерь энергии при перемагничивании. Поэтому некоторое время наблюдалось отставание в изучении диэлектрических свойств указанных сильномагнитных кристаллов.

До настоящего времени в приборах электроники используют материалы либо с магнитным, либо с сегнетоэлектрическим упорядочением. В то же время диэлектрические и оптические свойства мультиферроиков, как и взаимодействия упорядоченных спиновых и зарядовых состояний в них мало исследованы как экспериментально, так и теоретически. Потребности техники, связанные с созданием и усовершенствованием элементов, которые сочетают в себе достоинства энергонезависимой магнитной памяти и быстродействующих электрических систем обработки информации, способствовали привлечению интереса исследователей к синтезу новых составов мультиферроиков и исследованию их свойств. Изменение свойств материалов со структурой шпинели и перовскита, обусловленное частичным изовалентным замещением катионов в твердых растворах катионами редкоземельных металлов, создает условия для получения новых материалов, перспективных для использования при разработке, создании и эксплуатации уникального оборудования и современных устройств гражданского и военного назначения нового поколения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами)

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь: направлению №8 «Многофункциональные материалы и технологии», перечня Приоритетных направлений научных исследований на 2016–2020 гг., утвержденного постановлением № 190 Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г.; направлению №3 «Новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016 – 2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04. 2015 г. № 166); направлению – 4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021 – 2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г., №156).

Работа выполнена в УО «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина». Основные этапы диссертационной работы выполнены в рамках республиканских комплексных программ, утвержденных Постановлениями Президиума Национальной Академии наук Беларуси, проектов, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь, следующих научных программ и исследовательских проектов: НИР «Разработка физических методов синтеза твердотельных сред, перспективных для создания элементов твердотельной электроники и исследование их свойств» (1993-1996 гг., №ГР 01910055695); НИР «Механизмы фазовых переходов Мотта в полупроводниковых кристаллах» (1999-2001 гг., №ГР 1999728); ГПОФИ «Кристаллофизика», НИР «Механизмы сегнетоэлектрической неустойчивости перовскитоподобных кристаллов» (2001-2005 гг., №ГР 2001717); ГКПНИ «Кристаллические и молекулярные структуры», НИР «Получение, магнитные и электрические свойства высокотемпературных сегнетомагнетиков». (2006-2010 гг. № ГР. 20061180); НИР «Получение и физические свойства тонкопленочных мультиферроиков на основе феррита висмута», проект Ф11К-054 «Наноструктуры на основе оксидных мультиферроиков для спинтронных устройств» по договору с Научно-практическим центром НАН Беларуси по материаловедению (2011-2013 гг., № ГР 20111730); НИР «Диэлектрическая спектроскопия наноразмерных перовскитоподобных мультиферроиков на основе ферритов и манганитов». (2011-2013 гг., №ГР 20114415); НИР «Технология получения и физические характеристики тонкопленочных мультиферроиков на основе ферритов тербия и висмута» (2014-2015 гг., №ГР 20140205); НИР «Технология получения и магнитоэлектрические свойства высокотемпературных мультиферроиков на основе ортоферритов, ферритов-шпинелей и ферритов-гранатов редкоземельных элементов» (2016-2018 гг., №ГР 20160788).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в установлении закономерностей формирования и взаимодействия упорядоченных спиновых и зарядовых состояний в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита, содержащих редкоземельные элементы.

Для достижения поставленной цели решали следующие *задачи*:

– развитие методик синтеза образцов со структурой шпинели и перовскита содержащих редкоземельные элементы;

– установление закономерностей структурного, частотного и температурного изменения диэлектрических и оптических свойств на основании результатов широкодиапазонной диэлектрической спектроскопии, результатов изучения петель сегнетоэлектрического гистерезиса;

– установление закономерностей структурного и температурного изменения динамики кристаллической решетки на основании результатов рамановской спектроскопии;

– установление закономерностей структурного и температурного изменения магнитных свойств на основании результатов экспериментального исследования температурных и полевых зависимостей величин удельных намагниченностей, результатов изучения петель магнитного гистерезиса;

– установление закономерностей структурного и температурного изменения диэлектрических, оптических и магнитных свойств BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$, SmFeO_3 на основании результатов экспериментального исследования и первопринципных расчетов функций распределения электронной и спиновой плотностей;

– установление абсолютных величин характеристик магнитокалорического и электрокалорического эффектов, наблюдаемых при температурах фазовых переходов, обусловленных спиновой переориентацией и диэлектрической поляризацией BiFeO_3 на основании результатов экспериментального исследования и данных компьютерного моделирования.

Объекты исследования – поли- и монокристаллические образцы Fe_3O_4 , поликристаллические твердые растворы $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_{1,95}\text{R}_{0,05}\text{O}_4$ со структурой шпинели, поликристаллические $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{Lu} - \text{Ce}$), $\text{Bi}_{0,8}\text{Gd}_{0,2-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{0,8}\text{Er}_{0,2-x}\text{Dy}_x\text{FeO}_3$, $\text{BiFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$, $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ со структурой перовскита.

Предмет исследования – тип симметрии и параметры кристаллических решеток, магнитные и дипольные структуры: спиновые спирали, доменные границы в образцах мультиферроиков.

Научная новизна

1. Впервые методом твердофазных реакций в сочетании с холодным прессованием под давлением 4 ГПа синтезированы твердые растворы сложных составов, содержащих редкоземельные элементы $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_{1,95}\text{R}_{0,05}\text{O}_4$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) с кристаллической структурой шпинели пространственной группы $Fd\bar{3}m$; ортоферрита $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$), кристаллизующихся в

орторомбической структуре пространственной группы $Pbnm$ и $Bi_{1-x}R_xFeO_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1; R - La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Lu$) с преобладающим содержанием $R3c$ кристаллической фазы перовскита. Выявлены корреляции областей растворимости и особенностей кристаллического упорядочения с величинами ионных радиусов элементов замещения, с учётом взаимосвязи их электронных конфигураций и магнитного упорядочения. Установлены типы концентрационных фазовых структурных превращений « $R3c - Pnma$ » в твердых растворах $Bi_{1-x}Gd_xFeO_3$, $Bi_{1-x}Er_xFeO_3$, $Bi_{1-x}Dy_xFeO_3$, $Bi_{1-x}Tb_xFeO_3$; « $R3c - C222$ » в $Bi_{1-x}La_xFeO_3$; « $R3c - Pn2_1a$ » в $Bi_{1-x}Eu_xFeO_3$; « $R3c - P1$ » в $Bi_{1-x}Nd_xFeO_3$, « $R3c - Pbam$ » в $Bi_{1-x}Sm_xFeO_3$, $Bi_{1-x}Lu_xFeO_3$ ($0,15 < x < 0,2$).

2. Выявлены и исследованы корреляции структуры и диэлектрических свойств в катионзамещенных составах $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ и $Bi_{1-x}R_xFeO_3$. В результате изучения методами диэлектрической спектроскопии установлено, что керамические образцы $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ демонстрируют высокие значения действительных компонент диэлектрической проницаемости в низкочастотном пределе, что вызвано миграцией слабосвязанных (квазисвободных) носителей заряда и их накоплением на границах зерен.

3. Обнаружены и изучены корреляции особенностей кристаллической структуры и магнитных характеристик в катионзамещенных составах $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ и $Bi_{1-x}R_xFeO_3$. 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.

4. 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.

5. Впервые на основании анализа экспериментальных данных и результатов первопринципных расчетов зонной структуры, карт распределений электронной и спиновой плотностей $Bi_{0,75}Sm_{0,25}FeO_3$. определены особенности формирования полупроводникового состояния с шириной запрещенной зоны 1,28 эВ в результате взаимодействия сильнокоррелированных $3d$ -состояний электронов катионов железа и f -состояний электронов катионов самария. Топография карт распределения электронной плотности указывает на наличие выраженной ее асимметрии в f -подрешетке, что позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые особенности температурного поведения величины удельной намагниченности в рамках модели двухподрешеточной (d - и f -) магнитной структуры. Результаты измерений намагниченности состава $Bi_{0,75}Sm_{0,25}FeO_3$ подтверждают, что формирование слабого ферромагнитного состояния при низких температурах обусловлено взаимодействиями магнитных моментов катионов d - и f - подрешеток. Причиной сложного изменения намагниченности является конкуренция слабого ферромагнитного и антиферромагнитного вкладов вследствие фрустрации обменных взаимодействий между магнитоактивными подсистемами.

6. Впервые на основании результатов первопринципных расчетов электронной структуры в рамках теоретико-группового подхода проанализирована возможность индуцирования сегнетоэлектрического состояния в SmFeO_3 при температурах, меньших точки антиферромагнитного упорядочения магнитной подрешетки, образованной катионами самария. Топография карт распределения электронной плотности указывает на наличие выраженной ее асимметрии в f -подрешетке, и служит основанием для связи несобственной спонтанной сегнетоэлектрической поляризации в области низких температур с магнитоэлектрическим взаимодействием. При этом спиновая конфигурация соответствует представлению $\Gamma_{25}(F_x^d C_y^d G_z^d; F_x^f C_y^f; G_x^f A_y^f)$ магнитной симметрии d - и f -подрешеток. В области высоких температур возникновение областей со спонтанной электрической поляризацией возможно при наличии дополнительных факторов, понижающих симметрию кристалла.

Положения, выносимые на защиту

1. Уменьшение радиуса редкоземельного иона при замещении в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$) сопровождается увеличением химического давления и приводит к увеличению анионной поляризуемости с $2,22 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ до $2,28 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$, снижению времени релаксации поляризации с $6,84 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ до $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, увеличению вещественной части диэлектрической проницаемости ϵ как в низкочастотной области (с 84,88 до 91,28 при 10 Гц), так и в высокочастотной области (с 10 до 15 при 10^{10} Гц), а также росту значений ϵ в области фундаментального поглощения (с 5,01 до 5,10 при 900 см^{-1}) и снижению ширины запрещенной зоны для прямых (с 2,17 до 2,09 эВ) и непрямых (с 1,49 до 1,41 эВ) оптических переходов.

Установленные частотные диапазоны резонансного поглощения электромагнитного излучения и абсолютные величины значений вещественных компонент диэлектрической проницаемости являются основой для выбора оптимальных составов при синтезе новых материалов с заданными диэлектрическими и оптическими свойствами.

2. Замещение ионов никеля ионами цинка в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0 - 1$) вызывает изменения величин эффективных зарядов и значений межионных расстояний $\text{Fe} - \text{O}$ в окта- и тетраэдрических позициях элементарной ячейки твердых растворов, что приводит к уменьшению времени релаксации диэлектрической поляризации от $3,2 \cdot 10^{-8}$ до $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ в диапазоне ($10^3 - 10^8$) Гц и сопровождается увеличением низкочастотных значений вещественной составляющей диэлектрической проницаемости от 360 до 510 ед.; уменьшением высокочастотных значений вещественной составляющей диэлектрической проницаемости (с 16,2 до 8,8 ед.); и смещением (от 395 до 462 см^{-1}) и (от 579 до 552 см^{-1}) величин поперечных оптических фононов, связанных соответственно с колебаниями октаэдрических и тетраэдрических комплексов.

3. Разработана математическая модель на основе данных аппроксимации линейными (относительно величины радиуса R-катиона) функциями значений

резонансных частот, сил осцилляторов и коэффициентов затухания, полученных при деконволюции экспериментальных оптических и рамановских спектров твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Gd, Dy, Er}$), которая достоверно описывает формы оптических и рамановских спектров изоструктурных твердых растворов, содержащих в составе ионы редкоземельных элементов, суммой лоренцевских невзаимодействующих квазигармонических осцилляторов.

4. Уменьшение радиуса редкоземельного иона при замещении в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er}$) сопровождается уменьшением значений длин связей $\text{R} - \text{O}$ (от 2,252 до 2,205 нм), валентных углов $\text{Fe} - \text{O} - \text{Fe}$ (от 163,7 до 162,7 град.) в $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{0,9}\text{Er}_{0,1}\text{FeO}_3$ соответственно, и приводит к возрастанию величин коэрцитивных полей и остаточных удельных намагниченностей, уменьшению магнитоемкости и магнитоэлектрического коэффициента согласно следующим закономерностям:

- при температуре 5 К увеличение коэрцитивных полей (от 0,12 до 0,62 Тл) и остаточных удельных намагниченностей (от 0,03 до 0,19 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$);
- уменьшение в магнитном поле 0,4 Тл магнитоемкости на частоте 10 кГц (от 0,65 до 0,11%) и на частоте 80 кГц (от 2,60 до 1,32 %);
- уменьшение в магнитном поле 0,4 Тл магнитоэлектрического коэффициента на частоте 10 кГц (от 0,64 до 0,15 $\text{мВ}/(\text{см} \cdot \text{Э})$) и на частоте 80 кГц (от 3,49 до 1,41 $\text{мВ}/(\text{см} \cdot \text{Э})$).

5. Уменьшение радиуса редкоземельного иона при химическом замещении в твердых растворах $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er}$) сопровождается уменьшением значений валентных углов $\text{Fe} - \text{O} - \text{Fe}$ от 153,61 до 148,49 град., что приводит к убыванию относительной мощности охлаждения от 0,43 до 0,39 Дж/кг и величин магнитной составляющей энтропии от 0,015 до 0,012 Дж/(кг·К) и удельной теплоемкости от 0,125 до 0,008 Дж/(кг·К). Полученные данные подтверждают возможность практического использования магнитокалорического эффекта в твердых растворах $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ при создании высокотемпературных (750 - 850) К термомагнитных предохранителей для защиты элементов электрических цепей.

6. Уменьшение радиуса редкоземельного иона-заместителя в твердых растворах $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er}$) вызывает изменение длин межионных связей, структурные искажения, повороты и наклоны кислородных октаэдров, что приводит к увеличению магнитной составляющей энтропии от 0,001 до 0,003 Дж/(кг·К) и удельной теплоемкости от 1,11 до 5,20 Дж/(кг·К), а также относительной мощности охлаждения от 0,02 до 0,09 Дж/(кг·К). Полученные результаты подтверждают возможность практического использования электро- и магнитокалорического эффектов в мультикалориках $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er}$) при переходе «слабый ферромагнетик – парамагнетик» в диапазоне температур от 590 К до 640 К.

Личный вклад соискателя ученой степени

Автором самостоятельно проведен литературный и патентный поиск по теме исследования, обобщение и анализ результатов независимых исследований, определена цель, поставлены и решены задачи диссертационного исследования. Обоснование научной идеи и выбор

объектов исследования, систематизация, анализ и обобщение результатов аттестации образцов, а также совокупности экспериментальных данных выполнены лично соискателем.

Синтез объемных керамических образцов методом холодного прессования под высоким (4 ГПа) давлением и экспериментальное исследование температурных зависимостей величин удельных намагниченностей выполнен совместно с группой под руководством профессоров, докторов физ.-мат. наук Маковецкого Г.И. и Янушкевича К.И. (НПЦ по материаловедению НАН Беларуси). Исследования сегнетоэлектрических и диэлектрических свойств твердых образцов растворов проведены в лаборатории диэлектрических материалов Левенского католического университета (Бельгия) совместно с группой проф. М. Wübbenhorst и совместно с группой проф. доктора физ.-мат. наук Пащенко А.В. (Institute of Magnetism of NASU and MESU, Kyiv, Ukraine). Прецизионные измерения магнитных характеристик и оптических спектров коэффициента отражения выполнены совместно с канд. физ.-мат. наук Лозенко В.В. (Project Lead at ASML (Advanced Semiconductor Materials Lithography), Велдховен, Нидерланды) и научной группой под руководством директора INPAC (Institute for Nanoscale Physics and Chemistry, Католический Университет Лёвена, Бельгия) доктора физ.-мат. наук, профессора В. Мощалкова и профессора медицинского факультета Католического Университета Лёвена, (Бельгия) Марка Ван Хюлле. Теоретические расчеты зонной структуры, электронной и спиновой плотностей выполнены совместно с канд. физ.-мат. наук, доцентом Тригуком В.В. (БрГУ) и доктором физ.-мат. наук, профессором Ревинским А.Ф. (БрГУ). Обсуждение полученных результатов и подготовка публикаций проводились совместно с докторами физ.-мат. наук профессорами Анищиком В.М. (БГУ), Данилькевичем М.И. (БГУ), Ревинским А.Ф., кандидатами физ.-мат. наук, доцентами Амировым А.А. (Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия), Леденевым Н.А. (International Centre of Future Science of Jilin University, Changchun, China).

Участие соавторов опубликованных работ заключалось в проведении совместных экспериментальных исследований (измерение намагниченности, магнитной восприимчивости, теоретический расчет зонной структуры). Обработка, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка научных статей и тезисов докладов на научных конференциях, а также выводы в представленной работе сделаны автором по итогам обсуждения результатов с научным консультантом доктором физ.-мат. наук, профессором В.М. Анищиком.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований были представлены и обсуждены на международных научных конференциях, форумах и тематических семинарах: Czech and Slovak Conference on Magnetism (CSMAG) (Kosice, 2001, 2019), Third

International Conference on Inorganic Materials (Konstanz, Germany, 2002), Международная научная конференция «Наука и производство региона Аукштайтис» (Паневежис, Литва, 2002), XXXVII Zjazd Fizykw Polskich (Gdansk, Poland, 2003), Third European Charge Density Meeting and European Science Foundation Exploratory Workshop (ECDM-III) (Sandbjerg, Denmark, 2003), Международная научно-методическая конференция «Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии» (Брест, Беларусь, 2003), Республиканская научно-методическая конференция «Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии» (Брест, Беларусь 2012), Международная научно-практическая конференция «Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество» (Минск, Беларусь, 2004, 2006), Международный научно-практический семинар «Сегнетоэлектрические материалы» (Минск, Беларусь, 2004), XII Национальная конференция по росту кристаллов (НКРК-2006) (Москва, Россия, 2006), Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, Беларусь, 2003, 2005, 2007, 2011, 2016, 2023), Международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS) (п. Лоо, Крым, 2007, 2011, 2015; Ростов на Дону, Россия, 2016, 2017), Международный междисциплинарный симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO) (п. Лоо, Крым, 2008; Ростов на Дону, Россия, 2012, 2014, 2016, 2017), 1st Meeting of Institutional Partners (Leuven, Belgium, 2009), Международная научная конференция «ICFM-2011» (Крым, Украина, 2011), Международная научная конференция «Оксидні матеріали електронної техніки - отримання, властивості, застосування» (OMEE-2012) (Львов, Украина, 2012), Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники МССЭ» (Минск, Беларусь, 2006, 2014, 2020, 2022), Международный симпозиум «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» ФНС (Минск, Беларусь, 2011, 2016), European Materials Research Society (E-MRS-2017) (Warsaw, Poland, 2017), Int. Res. and Pract. Conf. «Nanotechnology and nanomaterials» (Nano-2018) (Киев, Украина, 2018), International conference Functional Materials and Nanotechnologies 2020 – FM&NT2020 (Vilnius, Lithuania, 2020), Международная научная конференция «Новые материалы и гелиотехнологии» (г. Паркент, Узбекистан, 2021), Международная научно-практическая конференция (Минск, Беларусь, 2022), Международная научно-практическая конференция по химии и химическому образованию «Менделеевские чтения» (Брест, Беларусь, 2024), X Международная конференции по химии и химическому образованию «Свиридовские чтения – 2024» (Минск, Беларусь, 2024), Международная научно-практическая конференция «Мультиферроики: получение, свойства, применение» (Витебск, Беларусь, 2024), XIII Всероссийская конференция с международным участием Химия твердого тела и функциональные материалы – 2024» (Санкт-Петербург, Россия, 2024), II Международная научно-

практическая конференция «Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики (АПФЭЭ-2024)» (Новополоцк, Беларусь, 2024).

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 88 работах, в числе которых: 2 монографии (15,3 авторских листа), 39 статей в рецензируемых научных журналах (43,11 авторских листа) в соответствии с частью первой п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 47 работ, включая 10 докладов, 16 материалов, 15 трудов и 6 статей в сборниках научных конференций (10,24 авторских листа). Общий объем опубликованных работ составляет 68,65 авторских листа.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 271 страницу, в том числе 45 таблиц занимают 15 страниц, 183 рисунка на 88 страницах, библиографический список содержит 303 наименования на 24 страницах, включая 88 публикаций соискателя на 6 страницах, 1 приложение на 5 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** представлен обзор научной литературы, в котором отражены основные сведения о структуре и физических свойствах материалов, изоструктурных объектам исследования. На основании анализа известных данных сделан вывод о том, что несмотря на значительное количество известных работ, вопросы о механизмах формирования диэлектрического отклика в широком интервале частот, включающем радио, СВЧ, ИК, УФ участки, остаются открытыми. В связи с этим актуальным является построение моделей, адекватно отражающих процессы, происходящие при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом. Несомненный интерес представляет изучение и моделирование диэлектрических и оптических функций твердых растворов, в которых производится катионное замещение в ряду различных бинарных систем. Перспективным для изучения наблюдаемых при этом явлений, представляется метод расчета диэлектрических спектров в модели невзаимодействующих квазигармонических осцилляторов, максимально учитывающей особенности кристаллического строения изучаемых систем, тип химической связи, межионные расстояния, массу, валентность и поляризуемость ионов.

Несмотря на значительное количество работ, в которых изучали диэлектрические свойства оксидных материалов в области электронных резонансов, до настоящего времени нет достаточно надежных оснований для точного отождествления особенностей, наблюдаемых в спектрах компонент диэлектрической проницаемости, с определенными оптическими переходами.

Вторая глава посвящена описанию технологии синтеза объемных керамических образцов со структурой шпинели $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($x = 0; 0,2; 0,3; 0,4; 1$), а также полученных в условиях холодного прессования при высоком (4 ГПа) давлении поликристаллических образцов со структурой шпинели $Ni_{0,8}Zn_{0,2}Fe_{1,95}R_{0,05}O_4$ ($R - La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er$), и перовскита $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ ($R - Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er$), $Bi_{1-x}R_xFeO_3$ ($R - La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er$); $x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$), $Bi_{0,8}Gd_{0,2-x}La_xFeO_3$, $Bi_{0,8}Dy_{0,2-x}Er_xFeO_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$), $BiFe_{1-x}TM_xO_3$ ($TM - Ni, Zn$; $x=0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,5$). Приведены сведения по условиям синтеза и результатам аттестации образцов. Исследованы фазовый и химический состав, структура, катионное распределение и устойчивость кристаллических решеток.

По данным рентгеноструктурного анализа твердых растворов $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ частичное замещение катионов никеля на изовалентные катионы цинка приводит к получению однофазной устойчивой шпинельной $Fd\bar{3}m$ структуры. Величины параметров кристаллических решеток линейно возрастают с увеличением содержания цинка. Результаты анализа дифрактограмм твердых растворов $Ni_{0,8}Zn_{0,2}Fe_{1,95}R_{0,05}O_4$ ($R - La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er$) свидетельствуют о том, частичная замена катионов железа на изовалентные катионы редкоземельных элементов приводит к получению кристаллической структуры с преобладающим содержанием шпинельной $Fd\bar{3}m$ фазы (рисунок 1).

Замещение ионов железа редкоземельными ионами приводит к формированию дополнительной фазы в виде ортоферритов $RFeO_3$ и систематическому изменению параметров кристаллической решетки из-за различия величин радиусов катиона железа и катионов редкоземельных элементов, что обусловлено эффектом $4f$ -сжатия. Параметры и объемы элементарных ячеек увеличиваются с ростом величин радиусов R -катионов. Твердые растворы $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ ($R - Nd, Gd, Dy, Er$) кристаллизуются в ромбической структуре с пространственной группой $Pbnm$ (№62).

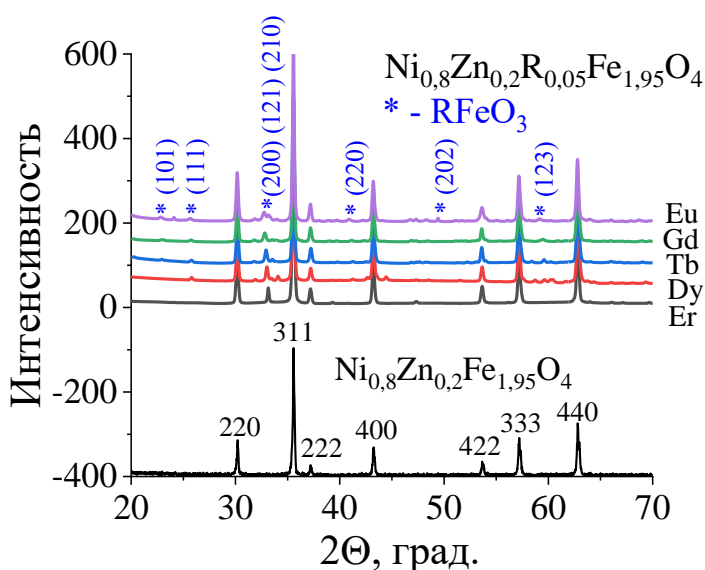


Рисунок 1 – Дифрактограммы твердых растворов $Ni_{0,8}Zn_{0,2}R_{0,05}Fe_{1,95}O_4$

На основании результатов линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей параметров кристаллических решеток, восстановлены параметры кристаллических решеток твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{Lu} - \text{La}$). Зависимости кристаллохимических характеристик представлены на рисунке 2.

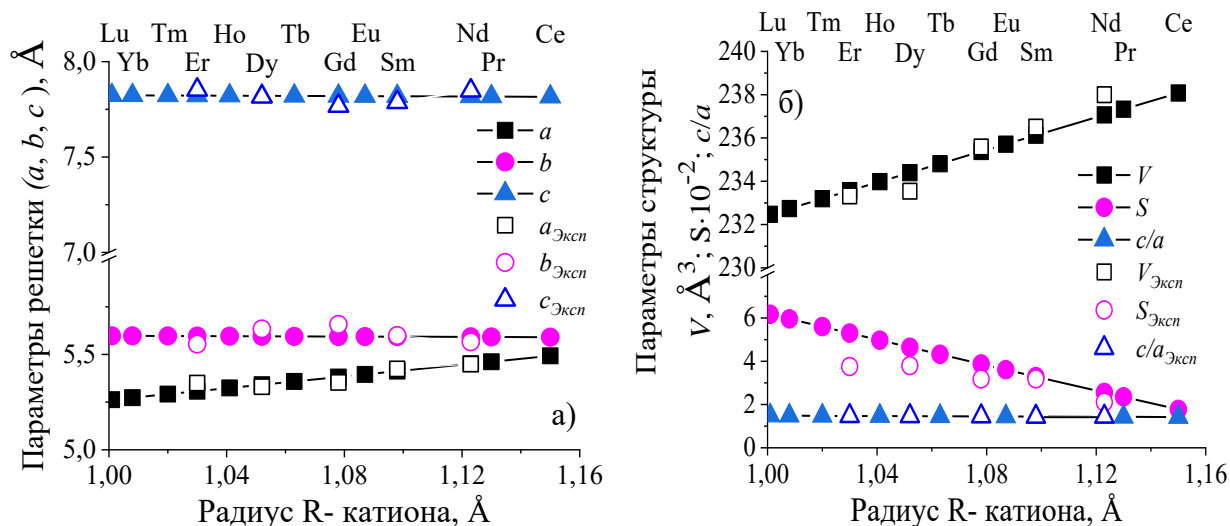


Рисунок 2 – Зависимости экспериментальных и рассчитанных значений параметров (a , b , c) и величин объемов (V) элементарных ячеек (а), величины октаэдрического искажения (S) и отношения (c/a) (б) твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ от величины радиуса R-катиона

Частичная замена катионов висмута изовалентными катионами редкоземельных элементов в твердых растворах $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}, \text{Lu}$) приводит к стабилизации кристаллической структуры с преобладающим содержанием $R3c$ фазы. Химическая и фазовая однородности образцов подтверждены данными сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа, свидетельствующими о том, что при степенях замещения $x = 0,05$ и $0,1$ составы образцов соответствуют стехиометрическим соотношениям. Как на поверхности образцов, так и по границам зерен отсутствуют следы примесей или фазовых выделений, что дополнительно подтверждает полное превращение исходных оксидов. Микроструктура как внешних, так и внутренних областей образцов хорошо развита с высокой плотностью и хорошо связанными зёрнами. Полученные результаты указывают на наличие структурных переходов « $R3c - Pnma$ » в твердых растворах $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Er}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Tb}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - C222$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - Pbnm$ » в $\text{Dy}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$; « $R3c - Pn21a$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - P1$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - Pbam$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Lu}_x\text{FeO}_3$ при концентрациях замещающих катионов $x = 0,15$ и $x = 0,2$.

Результаты рентгеноструктурного анализа твердых растворов $\text{BiFe}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_3$ ($\text{TM} - \text{Ni}, \text{Zn}$; $x = 0, 0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,5$) подтверждают отсутствие следов исходных оксидов и кристаллизацию основной фазы в

ромбоэдрической решетке, изоструктурной номинально чистому BiFeO_3 (ICSD № 51664, пр. гр. $R3c$). При получении образцов методами твердофазного синтеза неизбежно образуются вторичные фазы муллитового $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ (ICSD № 26808, пр. гр. $Pbam$) и силленитового $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ (ICSD № 41937, пр. гр. $I23$) типа. Для снижения содержания доли $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ было использовано выщелачивание стехиометрического состава шихты, предварительно обожженного при температуре, меньшей 675°C , выше которой интенсивно образуется $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. С ростом концентрации замещающих катионов обнаружено появление шпинельной фазы NiFe_2O_4 (ZnFe_2O_4) (ICSD № 76179, пр. гр. $Fd3m$), образование которой способствует связыванию избыточных катионов Fe^{3+} и препятствует появлению фазы муллита, следов которой при следов которого при $x > 0,15$ не выявлено.

Третья глава содержит результаты исследования диэлектрических и оптических функций образцов со структурой шпинели Fe_3O_4 , $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0; 0,1; 0,2$) и перовскита $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er}$), $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er}$); $x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$), $\text{Bi}_{0,8}\text{Gd}_{0,2-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{0,8}\text{Dy}_{0,2-x}\text{Er}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$). Результаты измерений, выполненных на низких частотах на шпинельных твердых растворах бинарной системы $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0; 0,2; 0,3; 0,4; 1$) при температуре 293 К, представлены релаксационными спектрами компонент диэлектрической проницаемости. Величина статической ϵ_s диэлектрической проницаемости в изученных шпинелях изменяется от 10^2 до 10^4 единиц. Наиболее сильная дисперсия ϵ_1 , выражается в ее уменьшении, происходящем с ростом частоты и приходится на диапазон от 10^7 до 10^8 Гц. Величина высокочастотного предела проницаемости $\epsilon_{1\text{вч}}$, изменяется от 16,2 ($x = 0$) до 8,8 ($x = 1$) единиц и близка к значениям $\epsilon_{77\text{К}}$, получаемым на той же частоте при низких температурах.

Величина тангенса угла диэлектрических потерь уменьшается с ростом частоты, проходя относительный максимум около частоты $1,26 \cdot 10^9$ Гц для никель-цинковых шпинелей с концентрацией катионов Zn^{2+} до 0,4. При $x = 1$ максимум $\text{tg}\delta_\epsilon$ локализован около частоты 10^6 Гц. Ниже частоты $(1 - 5) \cdot 10^4$ Гц (в зависимости от состава) величина $\text{tg}\delta_\epsilon$ снова резко возрастает. На низких частотах большая величина $\text{tg}\delta_\epsilon$ $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ферритов обусловлена вкладом квазисвободных носителей электрического тока в диэлектрическую поляризацию. При $\omega < 5,0 \cdot 10^4$ Гц у $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\omega < 5,0 \cdot 10^3$ Гц у $\text{Ni}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ диэлектрические потери связаны с проводимостью. При $\text{tg}\delta_\epsilon = 2\pi \cdot 10^{10}/(\rho\epsilon_1\omega) > 1$, т.е. исследуемые образцы можно рассматривать уже не как диэлектрики с большими потерями, а как проводники, обладающие значительной величиной мнимой составляющей электропроводности.

На рисунке 3 представлены диэлектрические спектры твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd}$).

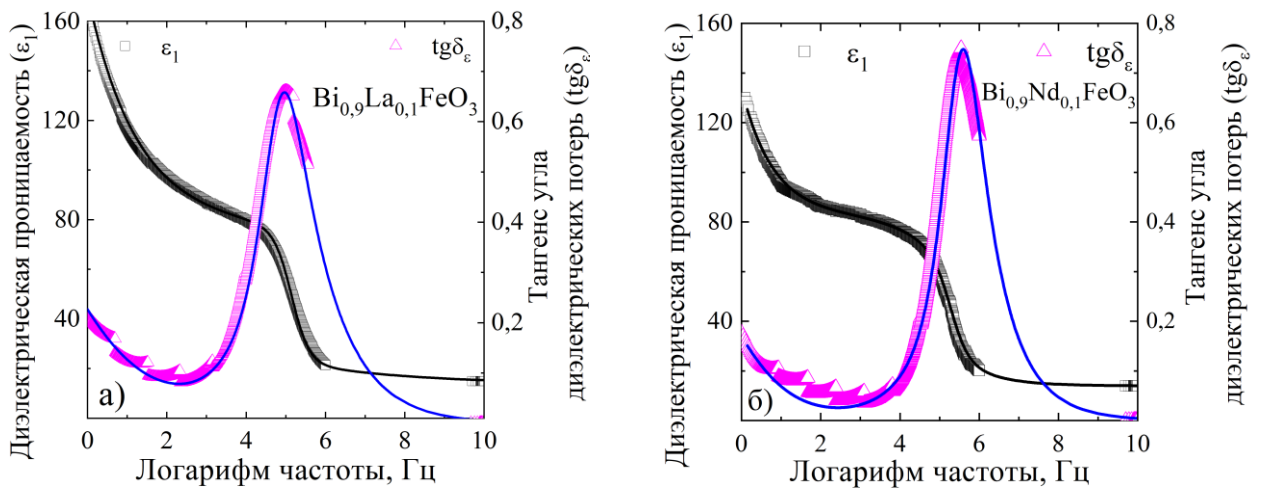


Рисунок 3 – Экспериментальные (точки) и модельные (линии) частотные зависимости диэлектрических функций твердых растворов $\text{Bi}_{0.9}\text{R}_{0.1}\text{FeO}_3$

В диапазоне частот от 1 Гц до 10^{10} Гц для них характерны релаксационного типа спектральные зависимости действительных компонент диэлектрической проницаемости $\epsilon_1(f)$ и тангенсов углов диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_\epsilon(f) = \epsilon_2(f) / \epsilon_1(f)$. В формировании диэлектрического отклика на низких частотах участвуют все возможные в данных материалах механизмы диэлектрической поляризации.

На основании анализа диэлектрических свойств выполнено моделирование диэлектрических функций $\text{Bi}_{0.9}\text{R}_{0.1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{Lu} - \text{La}$) в диапазоне частот ($1 - 10^{10}$) Гц с учетом механизмов поляризации, связанных с миграцией слабосвязанных (квазисвободных) носителей зарядов и их накоплением на границах зерен и перескоками электронов между разновалентными катионами железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}), занимающими эквивалентные кристаллографические положения (рисунок 4).

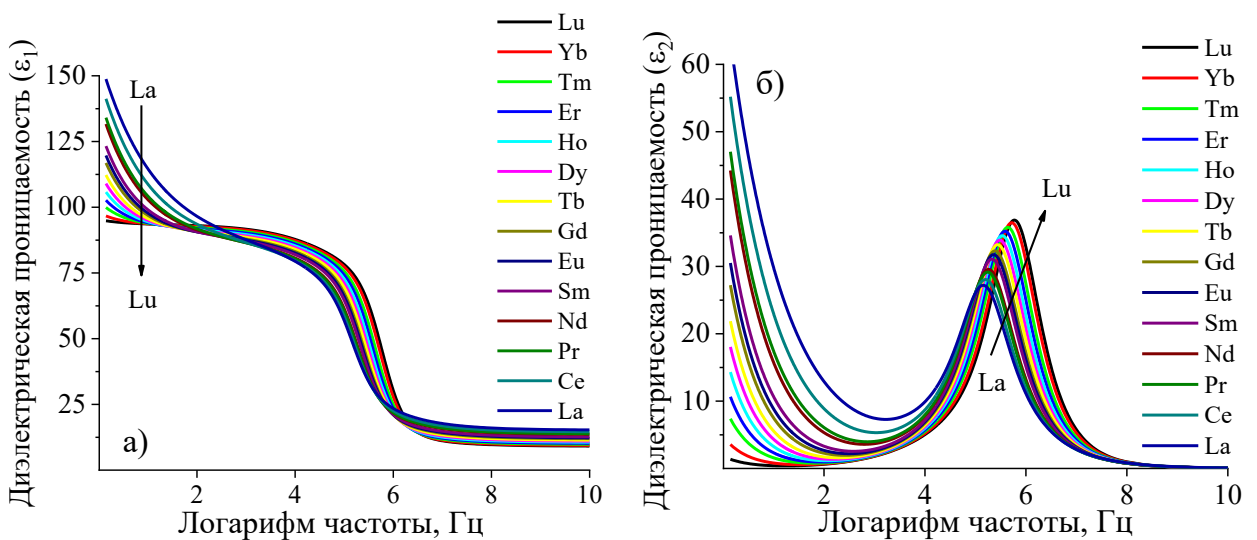


Рисунок 4 – Диэлектрические функции твердых растворов $\text{Bi}_{0.9}\text{R}_{0.1}\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{Lu} - \text{La}$)

В рамках модели Максвелла-Вагнера с использованием теории Купса изучено поведение релаксационного типа частотных зависимостей компонент комплексной диэлектрической проницаемости образцов в различных спектральных интервалах. Выделены виды, и механизмы диэлектрической поляризации образцов, связанные с движением носителей заряда внутри кристаллитов и их накоплением на границах зёрен, а также миграцией квазисвободных носителей заряда на расстояния, превышающие параметр кристаллической решётки. Изучено поведение параметров модели в зависимости от типа R-катиона.

Диэлектрические спектры твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ (R – Sm, Nd, Gd, Er) представлены на рисунке 5. В формировании диэлектрического отклика на низких частотах участвуют все возможные в данных материалах механизмы диэлектрической поляризации.

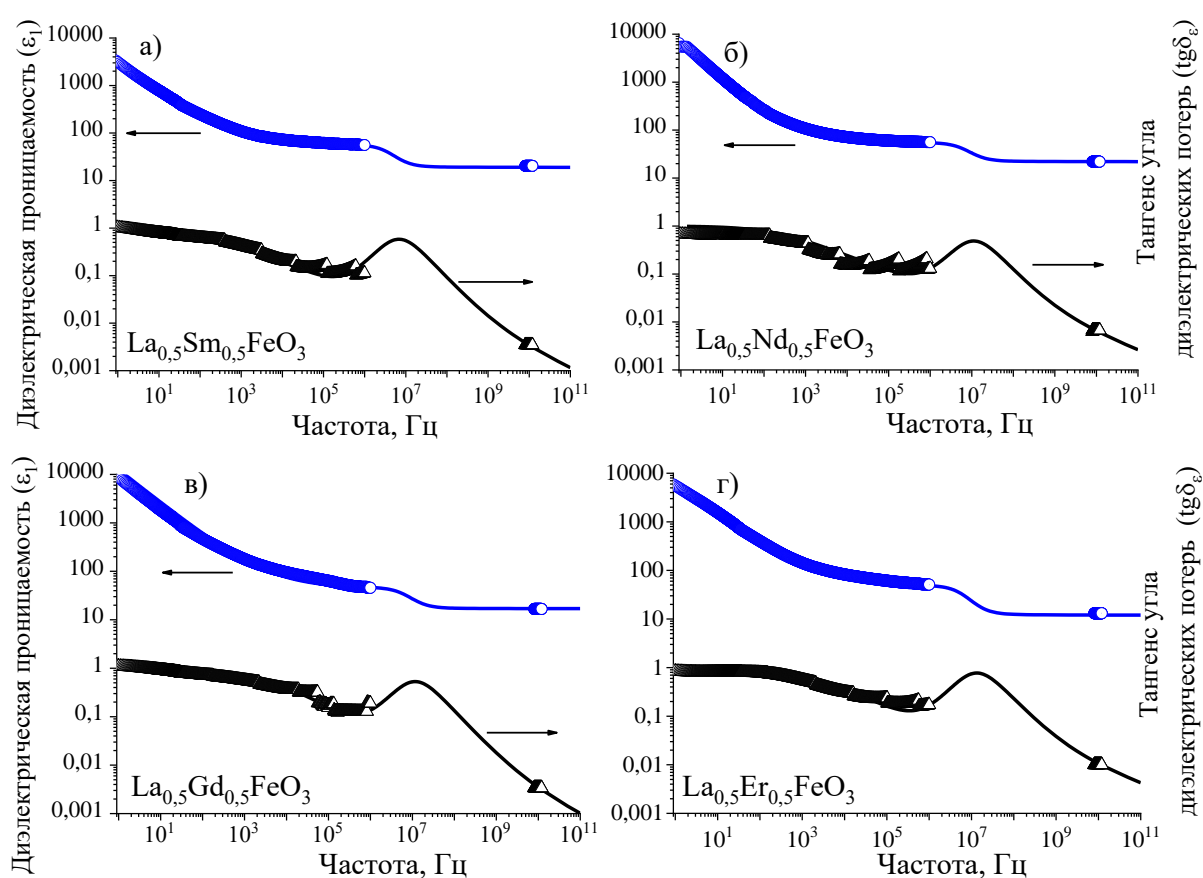


Рисунок 5 – Экспериментальные (точки) и модельные (линии) спектры действительных (ϵ_1) компонент диэлектрической проницаемости и тангенсов угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta_\epsilon$) твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ (R – Sm, Nd, Gd, Er)

Величины низкочастотных пределов ϵ_1 , измеренных при 293 К, составляют от 10^4 до 10^5 единиц, и обусловлены в основном процессами, связанными с миграцией носителей заряда и их накоплением на структурных несовершенствах и неоднородностях, которые всегда имеют место в реальных поликристаллических образцах и способны существенно влиять на диэлектрические свойства материалов. Высокие значения действительных

компонент диэлектрической проницаемости связаны также с низкой пористостью, которая приводит к увеличению эффективной площади контакта между кристаллитами.

Участок дисперсии ϵ_1 на частотах от 10^3 до 10^6 Гц связан с механизмом обмена валентностями, реализуемым в процессе перескоков электронов между разновалентными ионами железа Fe^{2+}/Fe^{3+} , занимающими октаэдрические положения в структуре ортоферрита. Рост частоты внешнего электрического поля влечет за собой уменьшение величины $\epsilon_1(\omega)$ вследствие уменьшения количества диполей, способных следовать за быстрыми изменениями полярности приложенного переменного электрического поля. Дальнейшая дисперсия проницаемости выражается в уменьшении величин ϵ_1 , происходящем с ростом частоты и переходом к установившимся значениям, обусловленным упругими электронной и ионной поляризациями и равным 17 - 24 единицам при частоте 10^8 Гц, выше которой вплоть до частоты 10^{11} Гц во всех твердых растворах величины ϵ_1 частотно-независимы.

На полученных в инфракрасной области спектральных зависимостях коэффициента отражения твердых растворов катионзамещенного феррита висмута, изображенных на рисунке 6, выражены решеточные резонансы. По результатам дисперсионного анализа и осцилляторного моделирования экспериментальных ИК спектров коэффициента отражения с высокой степенью количественного соответствия экспериментальным спектрам твердых растворов $Bi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ (R – La, Nd, Gd, Dy, Er) восстановлены модельные параметры и построены их зависимости от величины радиуса R-катиона. На основании результатов линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей параметров модельных спектров коэффициента отражения от типа R-катиона, восстановлены модельные параметры, и рассчитаны спектры коэффициентов отражения и оптических функций твердых растворов $Bi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ (R – Lu - La).

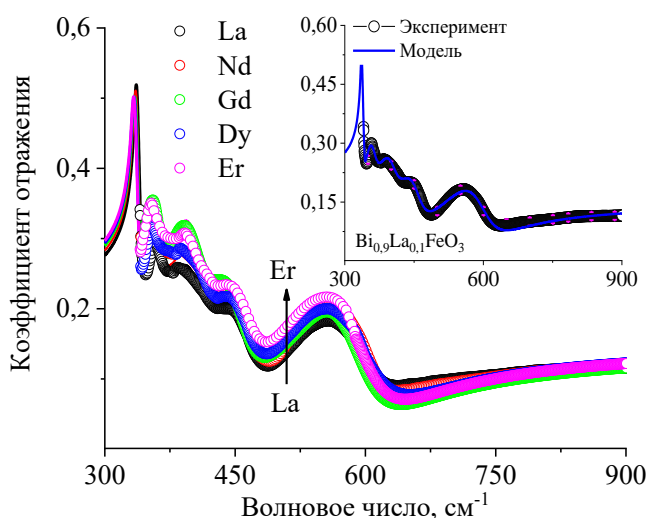


Рисунок 6 – Модельные (линии) и экспериментальные (точки) спектры коэффициента отражения твердых растворов $Bi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ (R – La, Nd, Gd, Dy, Er)

На рисунке 7 а изображены модельные спектры коэффициента отражения. Каждый из графиков смещен относительно нижележащего по оси ординат на 0,2 единицы. При уменьшении величины радиуса замещающего R^{3+} катиона в диапазоне от $\sim 150 \text{ см}^{-1}$ до 270 см^{-1} наблюдается смещение пиков в сторону низких частот. Изменение частот колебаний связано с одновременным влиянием двух факторов. С уменьшением значения радиуса R -катиона рост жесткости связи « $Vi(R) - O$ » вызывает увеличение частоты, а возрастание эффективной массы катиона, приводит к снижению частоты колебаний. Превалирует рост эффективной массы, и частота колебаний связи « $Vi(R) - O$ » снижается. Полученные данные согласуются с результатами изучения динамики кристаллических решеток $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ методом рамановской спектроскопии и свидетельствуют о влиянии эффекта химического давления на динамику кристаллической решетки и оптические свойства катионзамещенного феррита висмута.

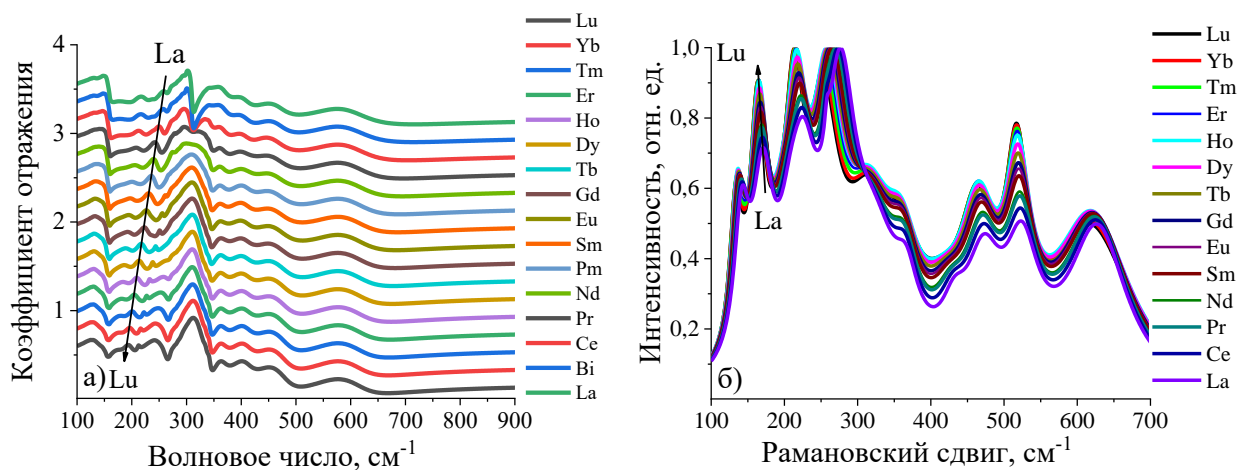


Рисунок 7 – Спектры коэффициента отражения (а) и комбинационного рассеяния света (б) твердых растворов $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$

С использованием данных, полученных при деконволюции экспериментальных спектров комбинационного рассеяния света твердых составов $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ ($R - La, Nd, Gd, Dy, Er$) по методу Лоренца, построены зависимости параметров уравнения Лоренца от величины радиуса R -катиона. На основании результатов аппроксимации данных линейными относительно величин радиусов R -катионов зависимостями, восстановлены параметры, которые использованы при построении модельных рамановских спектров твердых растворов $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ ($R - Lu - La$), изображенных на рисунке 7 б. Анализ результатов разложения экспериментальных рамановских спектров твердых растворов $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ ($R - La, Nd, Gd, Dy, Er$) позволил предсказать поведение рамановских мод твердых растворов $Vi_{0,9}R_{0,1}FeO_3$ ($R - Lu - La$) в зависимости от величины радиуса замещающего R -катиона.

Модельные спектры с высокой точностью воспроизводят все особенности рамановских спектров изоструктурных образцов, а величины рамановских сдвигов хорошо согласуются с результатами независимых

исследований, несмотря на существенно различающиеся методы и условия синтеза образцов. Полученные данные могут быть использованы при интерпретации результатов рамановской спектроскопии, прогнозировании формы рамановских спектров и неразрушающем контроле особенностей динамики кристаллической решетки подобных материалов, содержащих в своем составе катионы редкоземельных элементов. Данный подход может быть использован для предсказания положений и абсолютных величин геометрических параметров рамановских мод в содержащих в составе R-катионы перовскитах. На основании результатов анализа оптических функций образцов катионзамещенного феррита висмута $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – La, Nd, Sm, Gd, Dy, Er), изображенных на рисунке 8, выполнено моделирование оптических функций $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – Lu - La) в области фундаментального поглощения с учетом механизмов поляризации, связанных с перескоками электронов между разновалентными катионами железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}), занимающими эквивалентные кристаллографические положения.

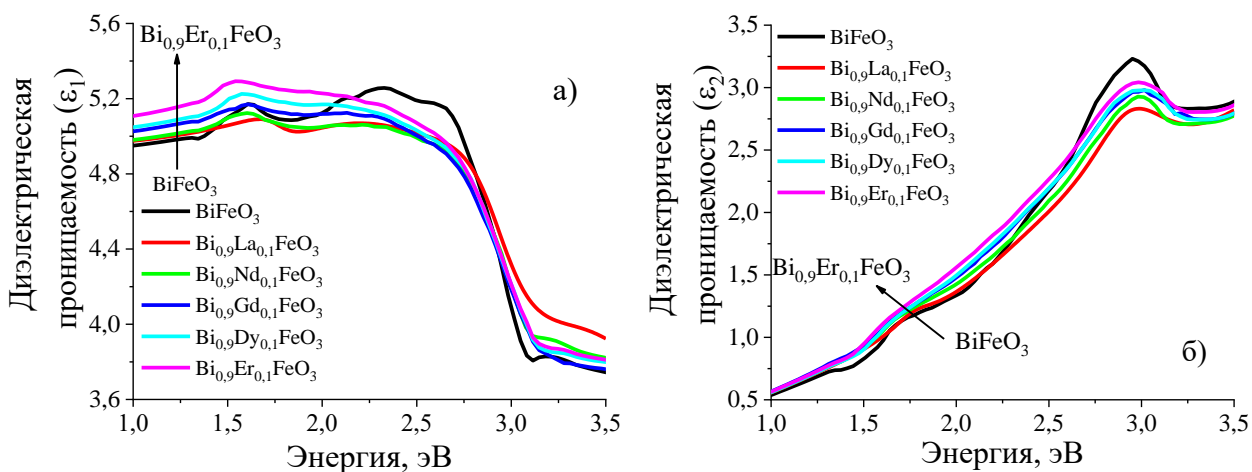


Рисунок 8 – Диэлектрические функции твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – La, Nd, Gd, Dy, Er)

По данным дисперсионного анализа и осцилляторного моделирования экспериментальных спектров коэффициента отражения с высокой степенью количественного соответствия экспериментальным спектрам твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – La, Nd, Gd, Dy, Er) в области фундаментального поглощения восстановлены модельные параметры и построены их зависимости от величины радиуса R-катиона. После аппроксимации экспериментальных зависимостей параметров модельных спектров коэффициента отражения от типа R-катиона линейными относительно величин радиусов R-катионов функциями, восстановлены параметры модельных спектров, с использованием которых рассчитаны спектры коэффициентов отражения и оптических функций твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – Lu - La). Определенные на основании анализа оптических спектров величины ширины запрещенной зоны недопированного феррита висмута равны 2,25 эВ для прямых и 1,62 эВ для непрямых переходов

соответственно. Как видно на рисунке 9, при частичном изовалентном замещении в феррите висмута катионов Bi^{3+} изовалентными R-катионами, в образцах возникает небольшое красное смещение поглощения, что свидетельствует об уменьшении ширины запрещенной зоны.

В диапазоне от 2,03 до 3,02 эВ формирование зонной структуры обусловлено результатом действия двух механизмов (рисунок 10 а). Первый связан с электронными переходами, происходящими по схеме ${}^6\text{A}_{1g} + {}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{G}) + {}^4\text{T}_{2g}({}^4\text{G})$, второй – от ${}^6\text{A}_{1g}$ к ${}^4\text{E}_g, {}^4\text{A}_{1g}({}^4\text{G})$ в поле лигандов октаэдрической координации. Участок поглощения в диапазоне от 1,61 до 2,03 эВ связан с электронными $d-d$ переходами в кристаллическом поле катионов Fe^{3+} . Дополнительный вклад вносят переходы с переносом заряда (CT-Charge Transition), формируя высокоэнергетическую область спектра.

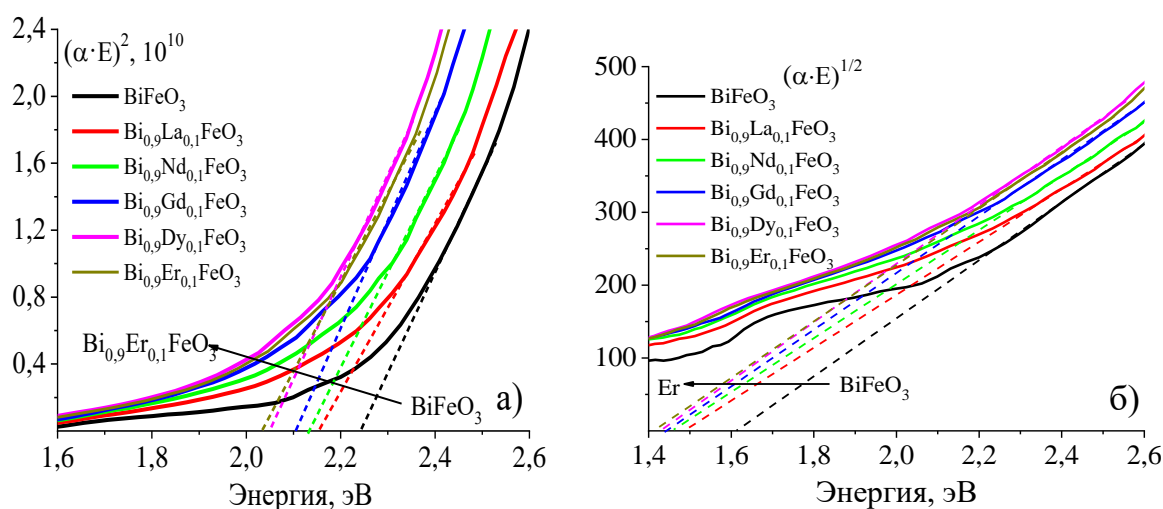


Рисунок 9 – Определение ширины запрещенной зоны твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – La, Nd, Gd, Dy, Er) по методу Тауца в модели прямых (а) и непрямых (б) переходов

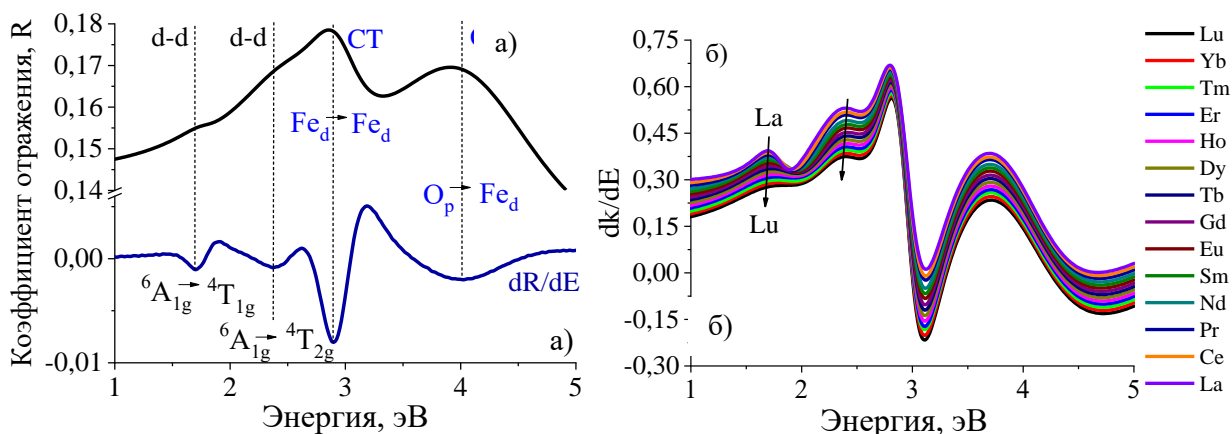


Рисунок 10 – Схема формирования оптического отклика $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ (а) и спектры первой производной коэффициента поглощения по энергии (б) твердых растворов $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ в области фундаментального поглощения

Результаты разложения спектров мнимой компоненты комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента поглощения BiFeO_3 подтверждают наличие ряда электронных переходов в исследуемом диапазоне энергий. При замещении катионов Bi^{3+} R-катионами в BiFeO_3 интенсивность $d-d$ -переходов (${}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}({}^4\text{G})$) снижается из-за уменьшения значений длин связей «Fe – O» и величин валентных углов «Fe – O – Fe» с уменьшением величины радиуса R- катиона. Для разрешения тонкой структуры электронных переходов рассчитанные спектры коэффициентов поглощения были продифференцированы по энергии (рисунок 10 б). Твердые растворы $\text{Bi}_{0,9}\text{R}_{0,1}\text{FeO}_3$ (R – La - Lu) изоструктурны, и малые красные сдвиги энергий $d-d$ переходов обусловлены эффектом химического давления. Это вызывается кооперативным эффектом, состоящим в одновременном наклоне кислородных октаэдров и изменении длин связей «Fe – O».

Абсолютные величины поляризуемостей катионов слабо зависят от ионного окружения, принимая близкие значения в разных твердых растворах. Поляризуемость анионов зависит от координационного числа, плотности упаковки и типов ближайших соседей. Согласно модели Лорентц–Лоренца, в кристаллах кубической симметрии величина электронной составляющей диэлектрической проницаемости в статическом пределе переменного электрического поля может быть вычислена по формуле:

$$\varepsilon_{\text{эл}} = \frac{1 + (8\pi/3)\sum_i N_i \alpha_i}{1 - (4\pi/3)\sum_i N_i \alpha_i}, \quad (1)$$

где N_i – и α_i – концентрация и поляризуемость ионов i – того типа. Электронные поляризуемости ионов Bi^{3+} и Fe^{3+} равны $1,38 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ и $0,48 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ соответственно.

В соответствии с правилом аддитивности, молекулярная поляризуемость сложного вещества $\alpha = 0,9\alpha_{\text{Bi}^{3+}} + 0,1\alpha_{\text{R}^{3+}} + \alpha_{\text{Fe}^{3+}} + 3\alpha_{\text{O}^{2-}}$. Величины поляризуемостей ионов кислорода ($\alpha_{\text{O}^{2-}}$), в зависимости от значений объемов (V) элементарных ячеек и поляризуемостей катионов висмута, редкоземельных элементов и железа, могут быть восстановлены из выражения (1), преобразованного для катионзамещенного феррита висмута к виду:

$$\alpha_{\text{O}^{2-}} = \frac{1}{24\pi} \left\{ 3V \left(\frac{\varepsilon_{\infty} - 1}{\varepsilon_{\infty} + 1} \right) - 8\pi \left[0,9\alpha_{\text{Bi}^{3+}} + 0,1\alpha_{\text{R}^{3+}} + \alpha_{\text{Fe}^{3+}} \right] \right\}. \quad (2)$$

Использованные при расчетах поляризуемости катионов $\alpha_{\text{R}^{3+}}$ взяты из результатов независимых исследований. Экспериментальные величины анионных поляризуемостей определены с использованием значений объемов элементарных ячеек твердых растворов, рассчитанных при анализе дифрактограмм по методу Ритвельда. Расчетные значения $\alpha_{\text{O}^{2-}}(\varepsilon_{\infty})$ и $\alpha(\varepsilon_{\infty})$

получены с использованием величин объемов элементарных ячеек, восстановленных по методу валентных связей. Величины ϵ_∞ определены в низкочастотном пределе спектров действительных компонент комплексной диэлектрической проницаемости, рассчитанных из экспериментальных спектров коэффициента отражения по методу Крамерса-Кронига. Отличие экспериментальных и расчетных значений $\alpha_{O^{2-}}(\epsilon_\infty)$ и $\alpha(\epsilon_\infty)$ не превышает соответственно 5,4 % и 4,2 %.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования температурных зависимостей величин удельных намагниченностей, на основании которых выявлены систематические изменения интенсивностей магнитных взаимодействий в зависимости от типа и концентраций R-катионов в твердых растворах $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ (рисунок 11). В рамках феноменологической модели температурную зависимость намагниченности (M) в окрестности точки Нееля можно описать как:

$$M = \left(\frac{M_i - M_f}{2} \right) \tanh[A(T_N - T)] + BT + C, \quad (3)$$

где M_i и M_f — начальная и конечная точки диапазона температур сФМ-АФМ перехода. Значения A, B и C определяются как $A = \frac{2(B - S_N)}{M_i - M_f}$, $B = \left(\frac{dM}{dT} \right)_{T_i}$ и

$$C = \left(\frac{M_i + M_f}{2} \right) - BT_N, \text{ где } S_N = \left(\frac{dM}{dT} \right)_{T_N}.$$

Данный подход позволяет корректно описать температурные зависимости намагниченности, форма которых близка к симметричной относительно точки $M(T_N)$, и предполагает использование параметра B, определяемого как чувствительность, т.е. тангенс угла наклона кривой в области, расположенной ниже температуры перехода. Для оптимизации данной модели температурная зависимость была разделена на две части, представленные интервалами $T < T_N$ и $T > T_N$, а затем результаты моделирования «сшиты» в точке перехода. Это позволяет с погрешностью, меньшей экспериментальной, рассчитать зависимость $M(T)$ в широком диапазоне температур.

Результаты анализа влияния на магнитные свойства твердых растворов $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$ магнитных моментов редкоземельных катионов подтвердили высокую чувствительность величин коэрцитивных полей и остаточных удельных намагниченностей к малым изменениям состава и структуры. Анализ результатов теоретических расчетов значений валентных углов «Fe – O – Fe», углов наклона октаэдров FeO_6 , длин связей «R – O», «Fe – O» указывает на их определяющую роль в установлении магнитного порядка. Изменение длин связей и величин валентных углов приводит к изменению условий косвенных, через кислород, обменных антиферромагнитных

взаимодействий, которые существенно сильнее прямых обменных связей «R – R» и «R – Fe».

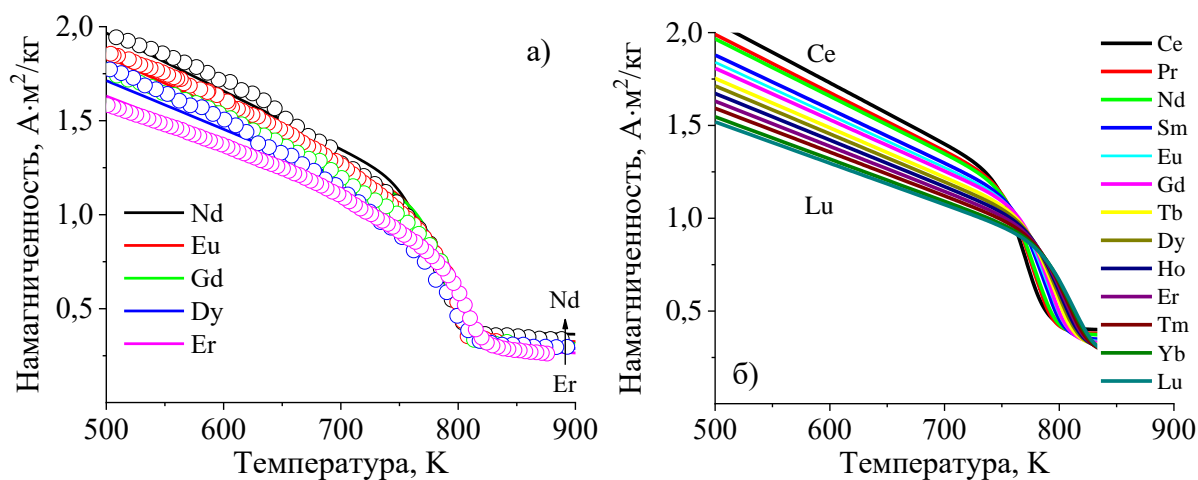


Рисунок 11 – Экспериментальные (а) и модельные (б) температурные зависимости величин удельных намагниченностей твердых растворов $La_{0,5}R_{0,5}FeO_3$

Изовалентное замещение катионов Vi^{3+} катионами редкоземельных элементов в феррите висмута приводит к подавлению пространственной спин-модулированной структуры и возникновению в твердых растворах слабого ферромагнитного отклика, величина которого зависит от концентраций и типов замещающих катионов (рисунок 12). Выявлено немонотонное поведение величин индексов глобальной нестабильности кристаллических решеток образцов катионзамещенного феррита висмута в зависимости от вида и концентрации замещающих катионов. Рост количества допирующих ионов вызывает увеличение коэрцитивных полей, динамика роста которых зависит от вида катионов-заместителей, их концентрации и температуры. Максимального значения данная характеристика достигает в твердых растворах с 15 и 20 % содержанием катионов лантана.

Меньшей величиной V_c обладают образцы, допированные катионами неодима. При $x = 0,2$ величина коэрцитивного поля не превышает 0,6 Тл. В твердых растворах с гадолинием и лантаном V_c достигает значений 0,87 Тл и 0,9 Тл соответственно, причем структурно обусловленный рост данной характеристики в лантанзамещенных твердых растворах происходит скачком уже при концентрации $x = 0,15$, обнаруживая более чем двукратное увеличение по отношению к твердому раствору с 10 % замещением. Относительно твердого раствора $Vi_{0,95}La_{0,05}FeO_3$ в $Vi_{0,8}La_{0,2}FeO_3$ обнаружен более чем восьмикратный рост величины коэрцитивного поля. Во всех твердых растворах при низких температурах более высокие значения намагниченности, однако, в твердых растворах с различным замещением катионов висмута, проявляется разная динамика роста. В поле 10 Тл при переходе от комнатной температуры до 2 К в твердом растворе $Vi_{0,8}Nd_{0,2}FeO_3$ наблюдается трехкратное увеличение величины намагниченности. В поле

0,4 Тл величина удельной намагниченности при переходе от комнатной температуры до 2 К в твердом растворе $\text{Bi}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{FeO}_3$ возрастает в 4 раза.

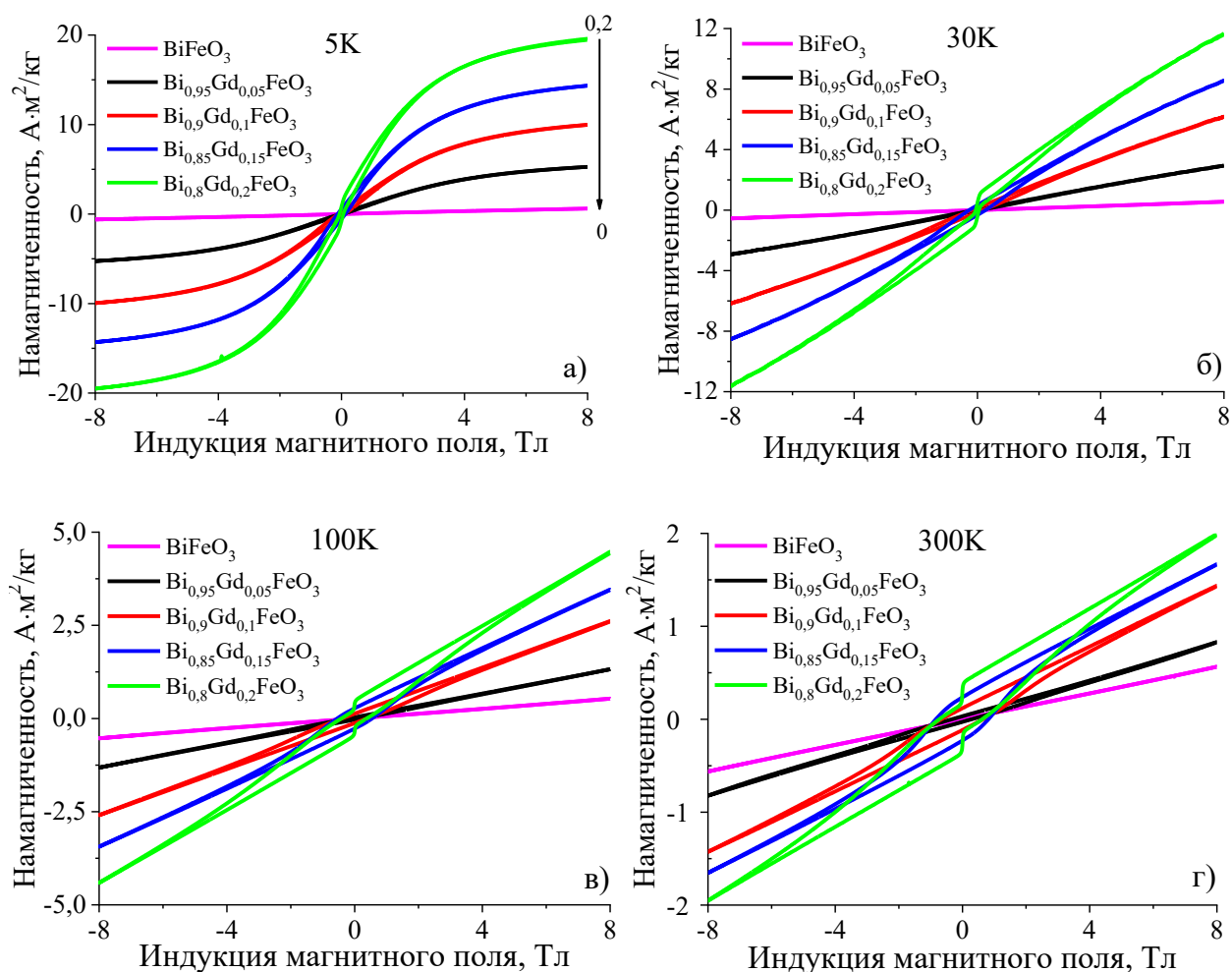


Рисунок 12 – Магнитопольные зависимости величин удельных намагниченностей твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$), измеренные при температурах 5 К (а), 30 К (б), 100 К (в), 300 К (г)

Частичное замещение катионов Fe^{3+} катионами Ni^{2+} или Zn^{2+} в феррите висмута приводит к подавлению пространственной спин-модулированной структуры и возникновению в твердых растворах $\text{BiFe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_3$ и $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ слабого ферромагнитного отклика, обусловленного коллективным действием различных типов магнитных взаимодействий. Открытые петли гистерезиса указывают на наличие слабого ферромагнитного порядка в $\text{BiFe}_{0,75}\text{Ni}_{0,25}\text{O}_3$ в широком интервале температур. Наблюдаемый в эксперименте рост намагниченности $\text{BiFe}_{0,75}\text{Ni}_{0,25}\text{O}_3$ относительно данных, полученных в стехиометрическом феррите висмута, связан как с подавлением спиновой циклоидальной структуры, так и с установлением ферромагнитных обменных взаимодействий между соседними ионами Fe^{3+} и Ni^{3+} .

В пятой главе представлены данные первопринципных расчетов зонной структуры и электронных свойств SmFeO_3 , BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$, $\text{BiFe}_{0,75}\text{Ni}_{0,25}\text{O}_3$. Результаты расчета зонной структуры, полученные в рамках

LSDA+U приближения DFT метода, показывают, что в основном состоянии ортоферрит самария является полупроводником с шириной запрещенной зоны 2,00 эВ при $U_{\text{eff}}=4,00$ эВ для $3d$ -электронов и $U_{\text{eff}}=6,00$ эВ для $4f$ -электронов (рисунок 12). Антиферромагнитно упорядоченная спиновая структура, формируемая в подрешетке ионов железа, при низких температурах взаимодействует с магнитной структурой, образованной ионами самария. Результаты теоретико-группового анализа подтверждают возможность индуцирования сегнетоэлектрического состояния в SmFeO_3 при температурах, меньших точки антиферромагнитного упорядочения магнитной f -подрешетки, образованной катионами самария. В области высоких температур возникновение областей со спонтанной электрической поляризацией возможно при наличии дополнительных факторов, понижающих симметрию кристалла. Изображенная на рисунке 13 топография карт распределения электронной плотности указывает на наличие выраженной ее асимметрии в f -подрешетке, и служит основанием для связи несобственной спонтанной сегнетоэлектрической поляризации в области низких температур с магнитоэлектрическим взаимодействием.

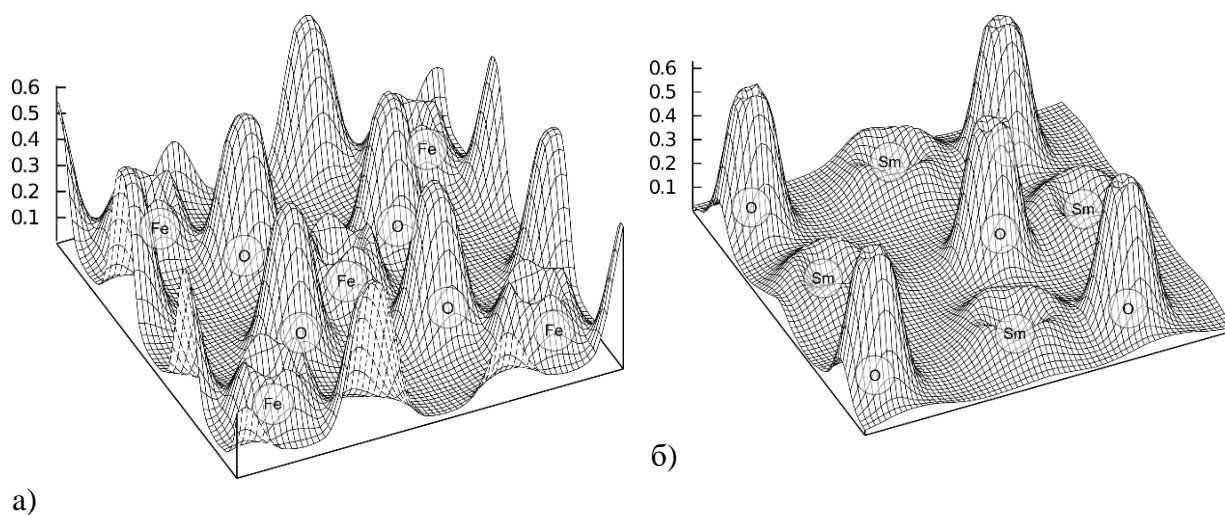


Рисунок 13 – Распределение электронной плотности в d - (а) и f - (б) плоскости SmFeO_3

На основании анализа рассчитанной из первых принципов методом функционала плотности в рамках приближения LSDA+U зонной структуры феррита висмута в сегнетоэлектрической и параэлектрической ромбоэдрических фазах установлено наличие линейной зависимости между значениями магнитных моментов катионов железа и величинами ширины запрещенной зоны, рассчитанными с использованием одинаковых параметров корреляционного взаимодействия. С ростом величины U_{eff} ширина запрещенной зоны увеличивается, и при $U_{\text{eff}} = 6,00$ эВ достигает величины $E_g = 2,40$ эВ, которая находится в хорошем согласии с опытными значениями 2,25 эВ. Вблизи уровня Ферми наблюдается некомпенсированный магнитный момент, свидетельствующий о том, что элементарная ячейка BiFeO_3 обладает отличным от нуля магнитным моментом, что подтверждает наличие у феррита

висмута слабого ферромагнетизма. Анализ барических зависимостей рассчитанных частот поперечных оптических фононов указывает на их высокую стабильность как для параэлектрической, так и для сегнетоэлектрической фазы, что является нетипичным для классических сегнетоэлектриков типа смещения. Результаты расчета дают основание рассматривать в качестве возможного механизма установления упорядоченного зарядового состояния конденсацию одной из двух мод $A_{2u}(TO_1)$ или $E_u(TO_1)$, неустойчивых при температурах, меньших точки фазового перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу.

Результаты первопринципных (LSDA+U приближение DFT метода) расчетов зонной структуры, приведенные на рисунке 14, свидетельствуют о том, что в основном состоянии мультиферроик $Bi_{0,75}Sm_{0,25}FeO_3$ является полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,28 эВ.

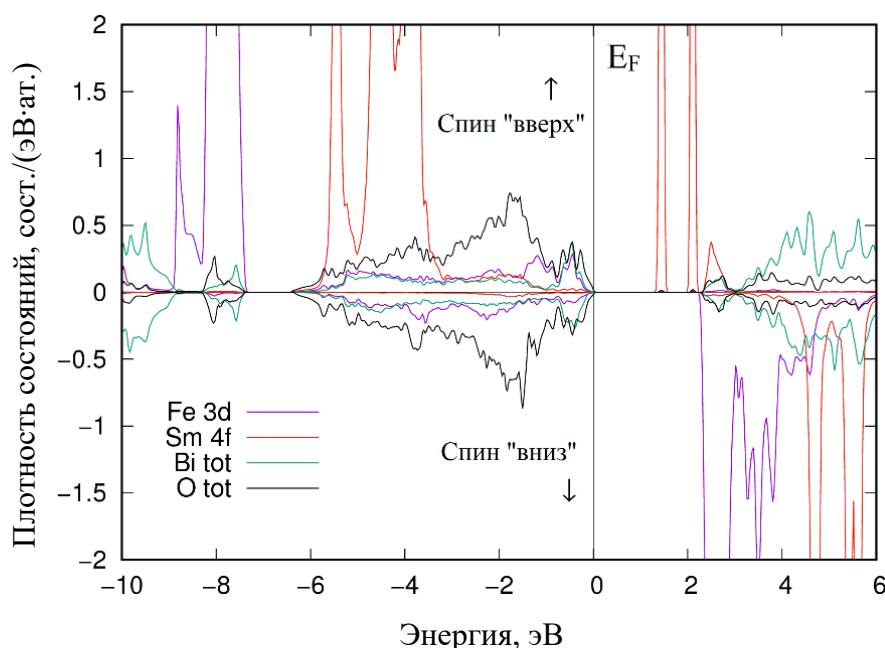


Рисунок 14 – Парциальные плотности электронных состояний в $Bi_{0,75}Sm_{0,25}FeO_3$

Определяющая роль в формировании энергетических полос вблизи уровня Ферми принадлежит сильнокоррелированным $3d$ -состояниям электронов катионов железа и f -состояниям электронов катионов самария. Антиферромагнитно упорядоченная спиновая структура, формируемая в подрешетке ионов железа, при низких температурах взаимодействует с магнитной структурой, образованной ионами самария. Зона проводимости сформирована в основном «спин вниз» $3d$ -состояниями железа, на фоне которых выделяются 2 пика при 1,28 эВ и 1,95 эВ, относящихся к «спин вверх» $4f$ -состояниям самария, которые являются своеобразным «фильтром» для электронов с определенной ориентацией спинового магнитного момента. Энергетические уровни сильнокоррелированных $3d$ -состояний железа и $4f$ - состояний самария локализованы, в значительной степени, в валентной зоне с положительным «спин вверх» направлением спина.

Топография карт распределения электронной плотности указывает на наличие ее асимметрии в f -подрешетке, что позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые особенности температурного поведения величины удельной намагниченности в рамках модели двухподрешеточной (d - и f -) магнитной структуры. Результаты измерений намагниченности твердого раствора $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$ подтверждают, что формирование слабого ферромагнитного состояния при низких температурах может быть обусловлено взаимодействиями магнитных моментов катионов d - и f - подрешеток. Сосуществование и конкуренция вкладов данных спин-упорядоченных структур определяют форму и количественные значения температурных зависимостей магнитных характеристик. Ион Sm^{3+} находится в магнитном окружении, которое формируется в результате наложения внешнего поля и поля магнитного обменного взаимодействия d -подсистемы. Одной из причин сложного изменения намагниченности является конкуренция ФМ и АФМ вкладов вследствие фрустрации обменных взаимодействий между магнитоактивными подсистемами.

В главе 6 приведены результаты экспериментальных исследований магнитоэлектрических взаимодействий и калорических эффектов в поликристаллических твердых растворах со структурой ортоферрита $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$, шпинели Fe_3O_4 и $\text{Fe}_{1,4}\text{Cr}_{1,6}\text{O}_4$, и перовскита $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($\text{R} - \text{La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er}$); $x = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$). Результаты исследования магнито- и электрокалорического эффектов в магнетите, указывают на возможность их практического использования как в области низкотемпературного ($T_B = 112 \text{ K}$) превращения Вервея, так и при температурах, соответствующих превращению «ферримагнетик – парамагнетик», которое в магнетите происходит в диапазоне (830-840) К. Результаты исследования магнитных свойств подтверждают наличие магнитокалорического эффекта в твердых растворах $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ (рисунки 15 и 16). Рассчитаны температурные зависимости величин изменения магнитной энтропии, теплоемкости, относительной мощности охлаждения. Полученные результаты могут быть использованы при изучении особенностей фазовых магнитных переходов в подобных материалах.

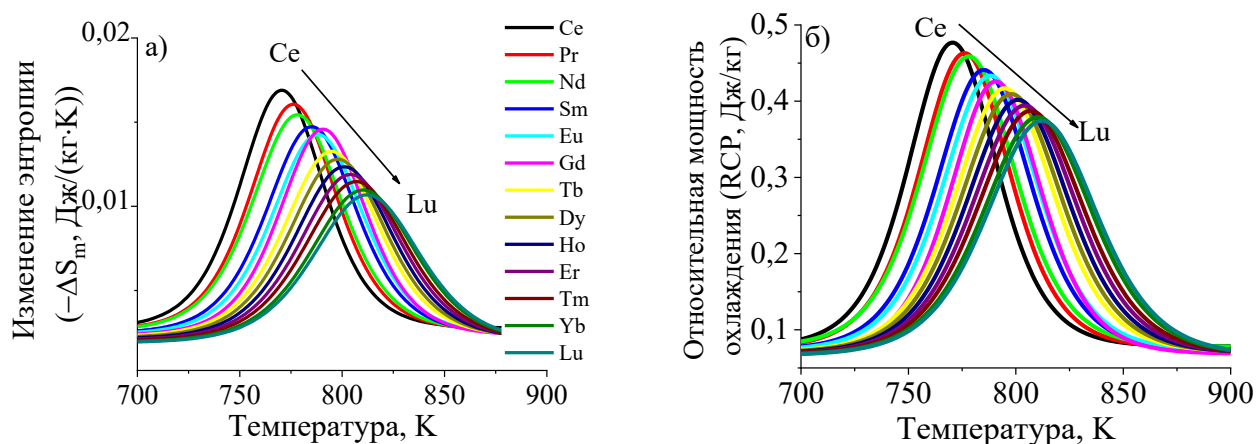


Рисунок 15 – Температурные зависимости изменения магнитного вклада в энтропию (а), относительной мощности охлаждения (б) твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$

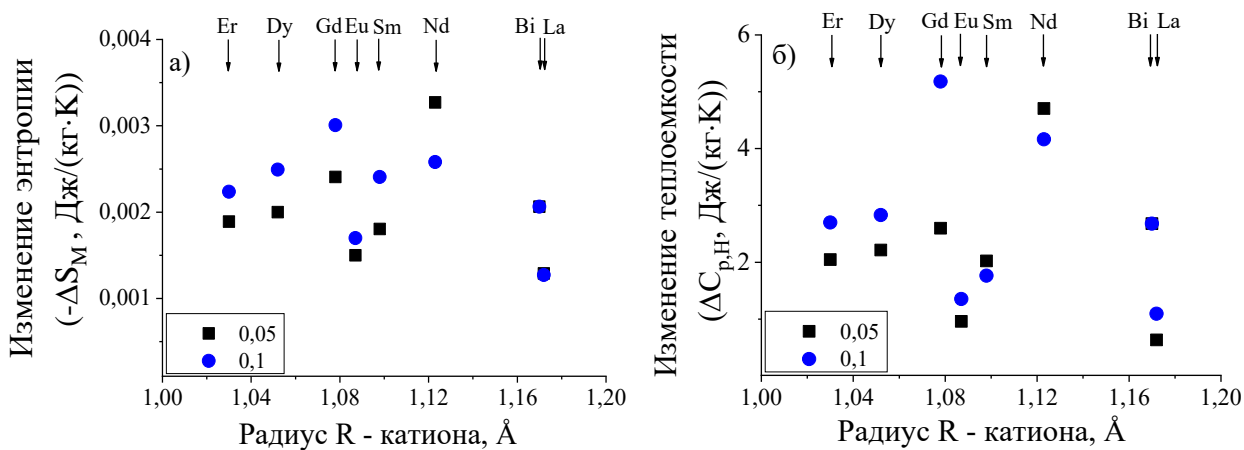


Рисунок 16 – Динамика изменения величин калорических характеристик твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1$) в области «сФМ – АФМ» перехода в зависимости от величины радиуса R-катиона

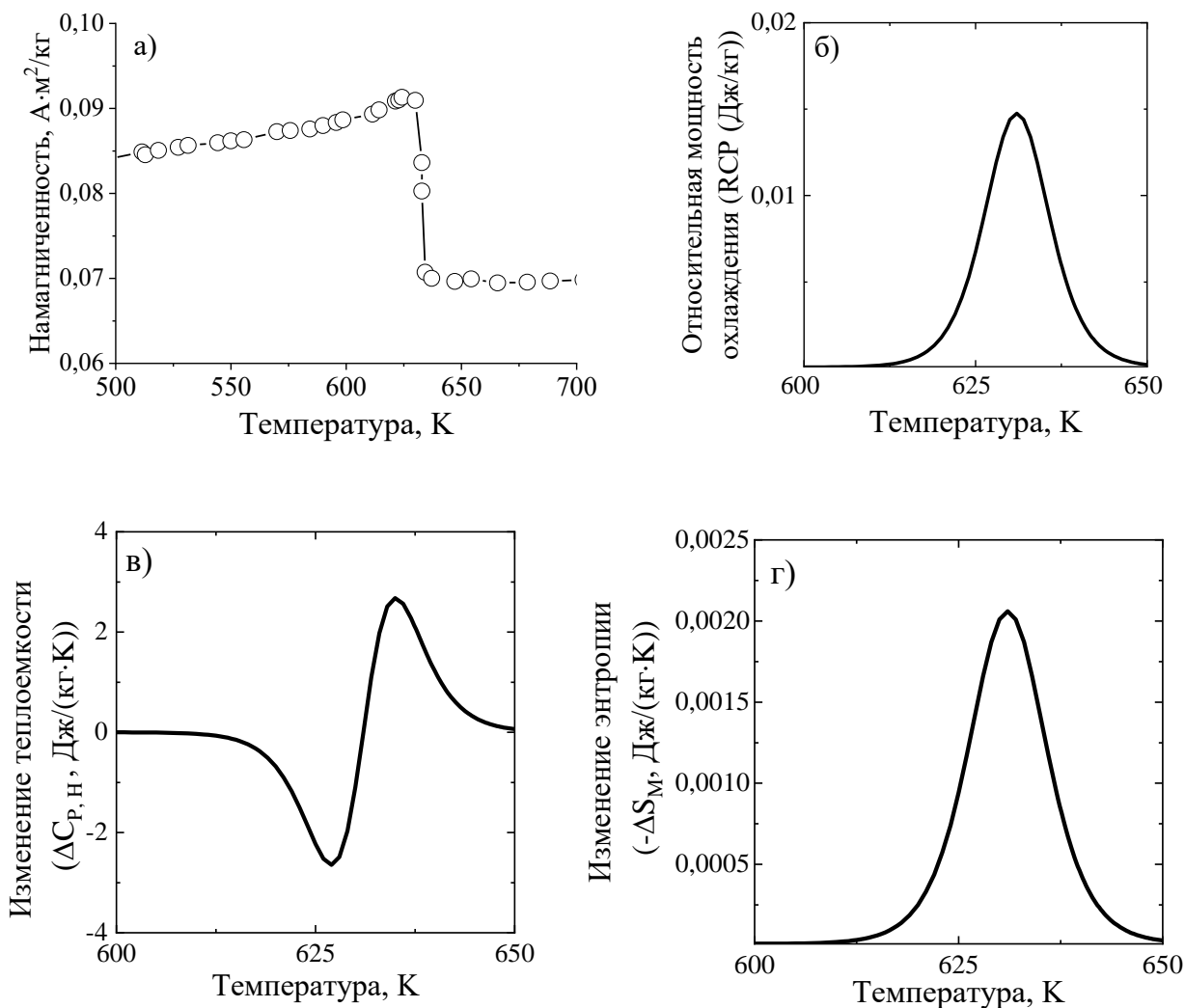


Рисунок 17 – Температурные зависимости величины удельной намагниченности (а) и относительной мощности охлаждения (б) BiFeO_3 в поле 0,86 Тл

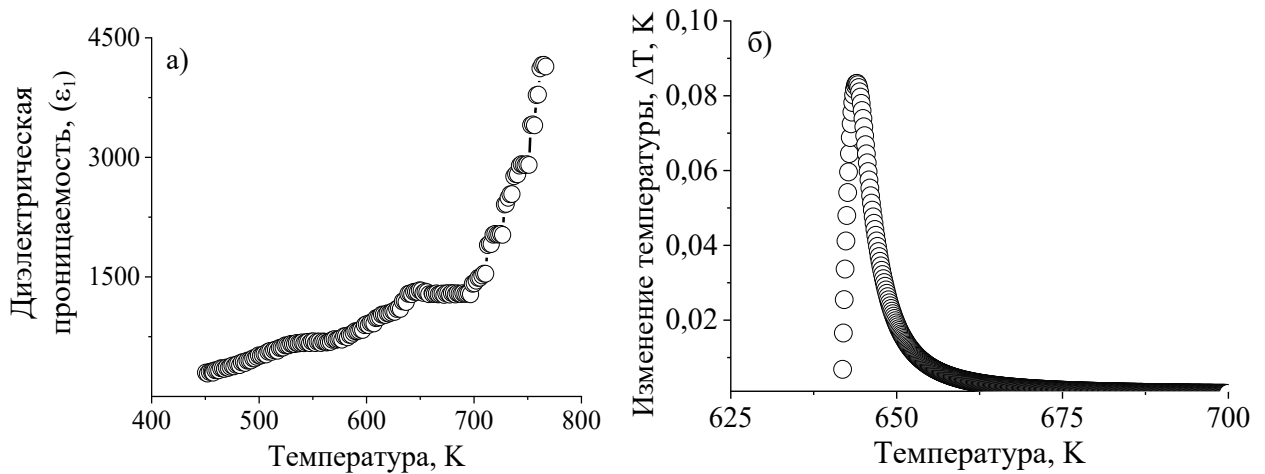


Рисунок 18 – Температурные зависимости величины действительной компоненты диэлектрической проницаемости (а) и изменения температуры (б) BiFeO_3 в электрическом поле 10 кВ/см

Термодинамические характеристики зависят от концентрации замещающих катионов, температуры и величины магнитного поля. Изображенные на рисунках 17 и 18 результаты исследования магнитных и диэлектрических свойств BiFeO_3 подтверждают наличие магнитокалорического эффекта в окрестности точки Нееля. Данные анализа результатов исследования электро- и магнитокалорического эффектов в феррите висмута в области температуры антиферромагнитного упорядочения дают основания отнести BiFeO_3 к мультикалорикам.

На рисунке 19 представлены температурные (а) и магнитопольные (б) зависимости величины магнитоэлектрического коэффициента, измеренные на твердых растворах $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$ на частоте 1 кГц.

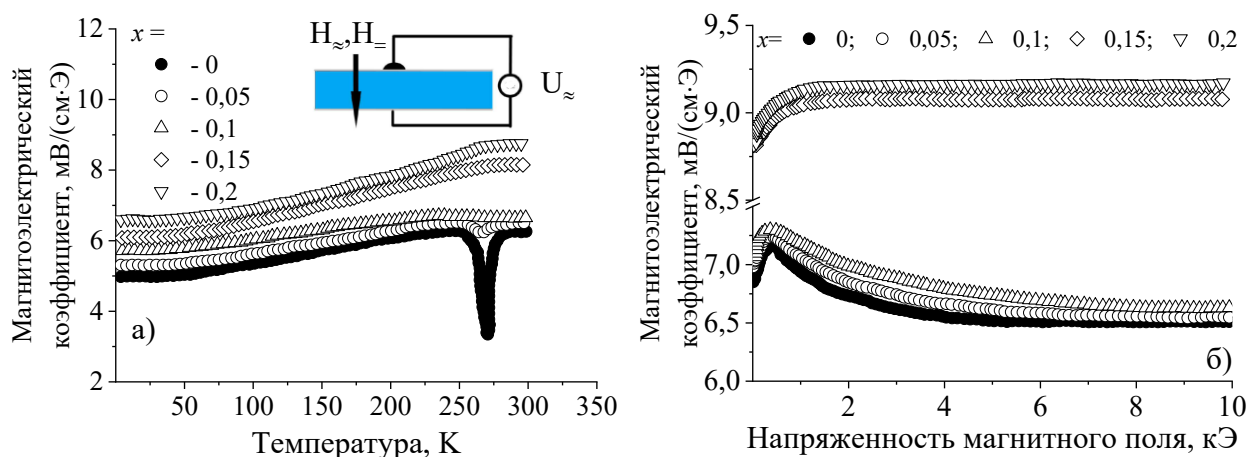


Рисунок 19 – Температурная (а) и магнитопольная (б) зависимости величины магнитоэлектрического коэффициента твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$

После прохождения через максимум в поле (0,3-0,5) кЭ с увеличением магнитного поля значения коэффициента магнитоэлектрического взаимодействия $\alpha_{\text{МЭ}}$ монотонно снижаются от 7,33 мВ/(см·Э) ($x = 0,1$),

7,22 мВ/(см·Э) ($x = 0,05$) и 7,16 мВ/(см·Э) ($x = 0$) до 6,79 мВ/(см·Э) ($x = 0,1$), 6,65 мВ/(см·Э) ($x = 0,05$) и 6,55 мВ/(см·Э) ($x = 0$) соответственно, в магнитном поле 10 кЭ. Полученные данные хорошо согласуются с моделью, объясняющей МЭ-эффект как результат спин-орбитального взаимодействия. В рамках двухподрешеточной модели при повышении температуры до температуры Нееля продольный МЭ коэффициент должен сначала увеличиться до некоторого максимального значения, а затем уменьшиться до нуля. С повышением температуры значение $\alpha_{\text{МЭ}}$ монотонно увеличивается и демонстрирует наличие резкого уменьшения вблизи температуры 265 К при значениях концентраций катионов Gd^{3+} $x < 0,1$. Максимальное значение $\alpha_{\text{МЭ}} = 9,15$ мВ/(см·Э) обнаружено в магнитном поле $H = 0,30$ кЭ в составе $\text{Bi}_{0,8}\text{Gd}_{0,2}\text{FeO}_3$ что дает основание считать данный твердый раствор перспективным материалом для использования в качестве элементной базы устройств микроэлектроники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установленное на основании результатов полнопрофильного анализа дифрактограмм, данных сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа синтезированных методом холодного прессования под высоким (4 ГПа) давлением твердых растворов $\text{La}_{0,5}\text{R}_{0,5}\text{FeO}_3$ ($R - \text{Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er}$), подтверждающих факт получения однофазных материалов, кристаллизующихся в орторомбической структуре с пространственной группой $Pbnm$ с соответствующим степени замещения стехиометрическим соотношением, систематическое увеличение объемов элементарных ячеек кристаллических решеток с ростом величин радиусов R -катионов, обусловленное эффектом $4f$ -сжатия из-за различия величин радиусов катиона лантана и катионов редкоземельных элементов [31–А, 35–А, 77–А].

2. Установленные на основании результатов полнопрофильного анализа дифрактограмм, данных сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа синтезированных методом холодного прессования под высоким (4 ГПа) давлением твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0,5; 0,1; R - \text{La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Lu}$) эффект стабилизации кристаллической структуры с преобладающим содержанием $R3c$ фазы с составами, соответствующими стехиометрическим соотношениям и наличие вызванных увеличением степени катионного замещения концентрационных структурных переходов « $R3c - Pnma$ » в образцах $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Er}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Tb}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - C222$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - Pbnm$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Dy}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - Pn2_1a$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - P1$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$; « $R3c - Pbam$ » в $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$, $\text{Bi}_{1-x}\text{Lu}_x\text{FeO}_3$ ($0,15 < x < 0,2$) [1–А, 2–А, 7–А, 10–А, 13–А, 15–А, 19–А, 21–А, 23–А, 26–А, 27–А – 29–А, 34–А, 39–А, 44–А, 48–А, 50–А, 57–А, 58–А, 61–А, 62–А, 66–А, 78–А, 79–А].

3. Установленные на основании анализа влияния типа и степени катионного замещения на магнитные свойства образцов со структурой

шпинели и перовскита, корреляции величин коэрцитивных полей и значений остаточных удельных намагниченностей с вариациями значений длин межионных связей и величин валентных углов, приводящие к изменениям условий косвенных, через кислород, обменных антиферромагнитных взаимодействий [2–А – 4–А, 7–А, 10–А, 11–А, 14–А, 19–А, 21–А, 22–А, 24–А, 26–А, 28–А, 30–А, 37–А, 43–А, 47–А, 52–А – 54–А, 56–А, 67–А, 68–А, 72–А, 81–А, 82–А, 84–А–86–А].

4. Разработанный и апробированный на образцах со структурой шпинели и перовскита, метод восстановления вида зависимостей от типа замещающего R-катиона структурных характеристик, диэлектрических, оптических и рамановских спектров основанный на моделировании кривых с использованием параметров, восстановленных при аппроксимации экспериментальных зависимостей соответствующих параметров изоструктурных образцов линейными зависимостями $y = a + b \cdot x$ ($x = r$ – радиус R - иона) [5–А, 6–А, 28–А, 31–А, 35–А, 36–А, 38–А, 40–А–42–А, 55–А, 57–А, 60–А, 62–А – 64–А, 69–А, 71–А, 73–А – 76–А, 78–А – 80–А, 83–А].

5. Установленные на основании анализа экспериментальных данных, полученных при исследовании диэлектрических и магнитных свойств и оценок величин термодинамических характеристик магнитноэлектрического, магнито- и электрокалорического эффектов в феррите висмута результаты, подтверждающие возможность отнесения данного соединения к классу мультикалориков [12–А, 18–А, 25–А, 26–А, 28–А, 32–А, 33–А, 35–А, 87–А, 88–А].

6. Результаты первопринципных расчетов барических зависимостей частот колебаний кристаллической решетки феррита висмута в низкотемпературной ($T < T_C$) сегнетоэлектрической ($R3c$) и высокотемпературной ($T > T_C$) параэлектрической ($R-3c$) ромбоэдрических фазах, подтверждающие их относительную высокую стабильность, что является нетипичным для классических сегнетоэлектриков типа смещения и служит основанием для объяснения механизма установления упорядоченного зарядового состояния в результате конденсации одной из двух мод $A_{2u}(TO_1)$ или $E_u(TO_1)$, неустойчивых при температурах, меньших точки фазового перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу [2–А, 8–А, 9–А, 16–А, 17–А, 51–А, 59–А].

7. Установленные на основании данных экспериментальных исследований и первопринципных расчетов зонной структуры, карт распределений зарядовых и спиновых плотностей результаты, подтверждающие эффект формирования слабого ферромагнитного состояния в $Bi_{0,75}Sm_{0,25}FeO_3$ при низких температурах вследствие сосуществования и конкуренции вкладов спин-упорядоченных структур катионов магнитоактивных d - и f - подрешеток, определяющих форму и количественные значения температурных зависимостей магнитных характеристик [8–А, 20–А, 21–А, 24–А, 45–А, 46–А, 49–А, 70–А].

8. Установленные на основании данных теоретико-группового анализа и первопринципных расчетов зонной структуры, карт распределений

электронной и спиновых плотностей результаты, подтверждающие связь несобственной спонтанной сегнетоэлектрической поляризации SmFeO_3 в области температур, меньших температуры антиферромагнитного упорядочения магнитной f -подрешетки, образованной катионами самария, с магнитоэлектрическим взаимодействием дипольной зарядовой и спинполяризованной конфигурации d - и f -подрешеток, соответствующей представлению $\Gamma_{25}(F_x^d C_y^d G_z^d; F_x^f C_y^f; G_x^f A_y^f)$ магнитной симметрии [20–А, 65–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные в результате выполнения диссертационной работы, указывают на возможность использования их при поиске и разработке новых магнитных материалов со структурой шпинели и перовскита с заданными функциональными свойствами. Исследованные материалы представляют научной интерес как модельные объекты, а результаты экспериментальных и теоретических исследований перспективны для практического использования при решении актуальных задач материаловедения при разработке и синтезе новых материалов для использования в качестве элементной базы электроники.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР в рамках республиканских комплексных программ «Кристаллофизика», «Кристаллические и молекулярные структуры», утвержденных Постановлениями Президиума Национальной Академии наук Беларуси, проектов, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры общей и теоретической физики физико-математического факультета Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина в курсах лабораторных и лекционных занятий по дисциплинам «Физика твердого тела», «Моделирование физических процессов», «Экспериментальная физика» (20 актов о внедрении результатов НИР в учебный процесс на кафедре общей и теоретической физики Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1–А. Макоед, И. И. Получение и физические свойства мультиферроиков : монография / И. И. Макоед ; УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина». – Брест : БрГУ им. А. С. Пушкина. – 2009. – 180 с. : рис., табл. – Библиогр.: с. 164.

2–А. Ревинский, А. Ф. Динамические и магнитные свойства мультиферроиков : монография / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед ; УО «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина». – Брест : БрГУ им. А. С. Пушкина. – 2012. – 200 с. : рис., табл. – Библиогр.: с. 187.

Статьи в рецензируемых научных журналах

3–А. Danil'kevich, M. I. Dielectric Properties of Spinel, Garnet and Perovskite Oxides / M. I. Danil'kevich, I. I. Makoed / *Physica Status Solidi (b)*. – 2000. – Т. 222. – P. 541–551.

4–А. Lomako, I. D. Dielectric properties of $Y_3Fe_5O_{12}$ garnet crystals in the IR range / I. D. Lomako, S. N. Shashkov, I. I. Makoed // *Crystallography Reports*. – 2005. – Vol. 50, № 6. – P. 966–973.

5–А. Ломако, И. Д. Диэлектрические свойства в ИК-диапазоне кристаллов граната $Y_3Fe_5O_{12}$ / И. Д. Ломако, С. Н. Шашков, И. И. Макоед // *Кристаллография*. – 2005. – Т. 50, № 6. – С. 1043 – 1051.

6–А. Магнитные свойства и распределение электронной плотности в системе $La_{1-x}Bi_xFeO_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. Кокошкевич, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, В. В. Тригук // *Неорганические материалы*. – 2007. – Т. 43, № 8. – С. 1 – 6.

7–А. Magnetic Properties and Electron Density Distribution of $La_{1-x}Bi_xFeO_3$ / A. F. Ravinski, I. I. Makoed, K. Kokoshkevich, K. I. Yanushkevich, A. I. Galyas, and V. V. Triguk // *Inorganic Materials*. – 2007. – Т. 43, № 8. – P. 860 – 865.

8–А. Ревинский, А. Ф. Зонная структура сильнокоррелированных систем / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, В. В. Тригук // *Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Матэматыка. Фізіка. Электроніка. Біялогія*. – 2008. – № 4. – С. 43–49.

9–А. Ревинский, А. Ф. О сегнетоэлектрической неустойчивости феррита висмута / А. Ф. Ревинский, В. В. Тригук, И. И. Макоед // *Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Фізіка. Матэматыка*. – 2010. – № 1. – С. 28–36.

10–А. Ravinski, A. Magnetyczno-dielektryczne wlasciwosci polikrystalicznej ceramiki $Gd_xBi_{1-x}FeO_3$ / A. Ravinski, I. Makoed, T. Lukaszewicz // *Materialy. Ceramiczne / Ceramic Materials*. – 2011. – Vol. 63. – P. 495–498.

11–А. Ревинский, А. Ф. Индуцированный магнитным полем фазовый переход в поликристаллическом $BiFeO_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед // *Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка*. – 2012. – №1. – С. 13–17.

12–А. Ревинский, А. Ф. Фазовый переход Мота-Хаббарда в феррите висмута / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед // *Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка*. – 2012. – №2. – С. 18–23.

13–A. Structural transformation and magnetoelectric behaviour in $\text{Bi}_{1-x}\text{Gd}_x\text{FeO}_3$ multiferroics / V. V. Lazenka, G. Zhang, J. Vanacken, I. I. Makoed, A. F. Ravinski, V. V. Moshchalkov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2012. – Vol. 45. – P. 125002-1–125002-7.

14–A. Weak ferromagnetism in La-doped BiFeO_3 multiferroics thin films / V. V. Lazenka, A. F. Ravinski, I. I. Makoed, J. Vanacken, G. Zhang, V. V. Moshchalkov // *Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 111. – P. 123916-1–12316-5.

15–A. Dielectric and optical properties gadolinium substituted of bismuth ferrite / A. F. Ravinski, I. I. Makoed, K. I. Yanushkevich, A. I. Galias, O. F. Demidenko, V. V. Lazenka & V. V. Moshchalkov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. – 2013. – Vol. 77, № 3. – P. 352–354.

16–А. Ревинский, А. Ф. Ab-initio расчеты динамики решетки и сегнетоэлектрическая неустойчивость мультиферроика BiFeO_3 / А. Ф. Ревинский, В. В. Тригук, И. И. Макоед // *Физика твердого тела*. – 2014. Т. 56, вып. 9. – С. 1739–1745.

17–A. Weak Ferromagnetism and Spin Density Distributions in Thin Films of $\text{Gd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ Solid Solutions / A. F. Revinskii, I. I. Makoed, V. V. Triguk, V. V. Lazenka, K. I. Yanushkevich, A. I. Galyas, O. F. Demidenko, A. M. Panasevich, and V. V. Moshchalkov / *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. – 2014. – Vol. 78, № 8. – P. 690–693.

18–А. Макоед, И. И. Корреляции диэлектрических и магнитных свойств магнетита / И. И. Макоед // *Вестник Брэсцакага ўніверсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка*. – 2014. – № 2. – С. 22–28.

19–А. Макоед, И. И. Особенности эволюции магнитных свойств феррита висмута, модифицированного катионами редкоземельных элементов / И. И. Макоед, А. Ф. Ревинский / *Физика твердого тела*. – 2015. – Т. 57, вып. 9. – С. 1742–1747.

20–А. Тригук, В. В. Электронная структура и несобственная электрическая поляризация ортоферрита самария / В. В. Тригук, И. И. Макоед, А. Ф. Ревинский / *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58, вып. 12. – С. 2355–2360.

21–А. Особенности поведения магнитных свойств мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$, синтезированных под высоким давлением / И. И. Макоед, А. Ф. Ревинский, В. В. Лозенко, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, А. М. Живулько, К. И. Янушкевич, В. В. Моцалков / *Физика твердого тела*. – 2017. – 59, вып. 8. – С. 1514–1519.

22–А. Теплоемкость наноструктурированных мультиферроиков $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ / А. А. Амиров, С. Н. Каллаев, З. М. Омаров, Д. М. Юсупов, Y. A. Chaudhary, S. T. Bendre, И. И. Макоед / *Физика твердого тела*. – 2017. – 59, вып. 9. – С. 1859-1862.

23–A. Structure and dielectric properties of $\text{Bi}_{0.80}\text{Gd}_{0.20-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ multiferroics / I. I. Makoed, A. F. Ravinski, N. I. Gorbachuk, A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, A. A. Amirov, D. M. Yusupov, K. I. Yanushkevich // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2018. – Vol. 82, № 5. – P. 570–573.

24–A. Magnetic properties and electronic structure of $\text{Bi}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}\text{FeO}_3$ multiferroic / A. F. Ravinski, I. I. Makoed, V. V. Triguk, V. V. Lazenka, A. I. Galyas, O. F. Demidenko, K. I. Yanushkevich, V. V. Moshchalkov // *Computational Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 14. – P. 15–19.

25–A. Magnetocaloric Effect in $\text{BiFe}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}_3$ Multiferroics / A. A. Amirov, I. I. Makoed, Y. A. Chaudhari, S. T. Bendre, D. M. Yusupov, A. Sh. Asvarov,

N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2018. – Vol. 31. – P. 1–6.

26–A. Evolution of Structure and Magnetic Properties in $\text{EuBi}_{1-x}\text{FeO}_3$ Multiferroics Obtained under High Pressure / I. I. Makoed, A. A. Amirov, N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, K. I. Yanushkevich, D. V. Yakimchuk, E. Y. Kaniukov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 489. – P. 165379-1–165379-10.

27–A. Structure, Non-stoichiometry, Valence of Ions, Dielectric and Magnetic Properties of Single-Phase $\text{Bi}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{FeO}_{3-\delta}$ Multiferroics / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, Q. Li, D. D. Tatarchuk, V. A. Turchenko, I. I. Makoed, V. Ya. Sycheva, A. V. Voznyak, V. P. Kladko, A. I. Dudimenko, Y. V. Didenko, A. T. Kozakov, G. G. Levchenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 483. – P. 100–113.

28–A. Predicted model of magnetocaloric effect in BiFeO_3 -based multiferroics. Solid State Sciences / I. I. Makoed, A. A. Amirov, N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, K. I. Yanushkevich // Solid State Sciences. – 2019. – Vol. 92. – P. 105920-1–165379-7.

29–A. Liquid-phase sintered bismuth ferrite multiferroics and their giant dielectric constant / N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, V. A. Turchenko, V. Ya. Sycheva, A. V. Voznyak, V. P. Kladko, A. I. Gudimenko, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, I. V. Fesych, I. I. Makoed, A. T. Kozakov, G. G. Levchenko. Ceramics International. – 2019. – Vol. 45. – P. 11873–14879.

30–A. Effect of Co-Doping on Magnetic Properties of Bismuth Ferrite / I. Makoed, V. Prigodich, K. Yanushkevich, A. Zhivulko, V. Zhivulko, A. Galias, O. Demidenko and D. Krivchenya // Acta Physica Polonica A. – 2020. – Vol. 137, № 5. – P. 985–988.

31–A. Influence of rare-earth doping on the structural and dielectric properties of orthoferrite $\text{La}_{0.50}\text{R}_{0.50}\text{FeO}_3$ ceramics synthesized under high pressure / I. I. Makoed, N. A. Liedienov, A. V. Pashchenko, G. G. Levchenko, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. A. Amirov, G. S. Rimski, K. I. Yanushkevich // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 842. – P. 155859-1–155859-11.

32–A. Амиров, А. А. Мультикалорический эффект в феррите висмута / А. А. Амиров, И. И. Макоед, Д. М. Юсупов // Челябинский физико-математический журнал. – 2020. – Т. 5, вып. 2. – С. 140–149.

33–A. Magnetoelectric Properties of Zinc-Substituted BiFeO_3 Multiferroics / D. M. Yusupov, A. A. Amirov, I. I. Makoed, Y. A. Chaudhary, and S. T. Bendre // Physics of the Solid State. – 2020. – Vol. 62, № 8. – P. 1346–1349.

34–A. Control of dielectric properties in bismuth ferrite multiferroic by compacting pressure / A. V. Pashchenko, N. A. Liedienov, Q. Li, I. I. Makoed, D. D. Tatarchuk, Y. V. Didenko, A. I. Gudimenko, V. P. Kladko, L. Jiang, L. Li, V. G. Pogrebnyak, G. G. Levchenko // Materials Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 258. – P. 123925-1 – 123925-6.

35–A. Influence of rare-earth doping on the structural and magnetic properties of orthoferrite $\text{La}_{0.50}\text{R}_{0.50}\text{FeO}_3$ ceramics obtained under high pressure / I. I. Makoed, N. A. Liedienov, H. Zhao, G. G. Levchenko, A. A. Amirov, G. S. Rymski, A. M. Zhivulko, K. I. Yanushkevich // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2022. – Vol. 170. – P. 110926-1 – 110926-10.

36–А. Шестаков, М. В. Синтез и магнитные свойства цинк-теллуритных стекол, активированных наночастицами магнетита / М. В. Шестаков, И. И. Макоед, В. В. Мошалоков // Физика твердого тела. – 2023. – Т.65, № 5. – С. 802–808.

37–А. Термодинамические свойства $\text{Bi}_{0,8}\text{Dy}_x\text{Er}_{1-x}\text{FeO}_3$ / С. Н. Каллаев, З. М. Омаров, А. Р. Билалов, А. А. Амиров, И. И. Макоед, К. И. Янушкевич, Х. Х. Абдуллаев // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66, № 4. – С. 599–602.

38–А. Макоед, И. И. Рамановская спектроскопия мультиферроиков, синтезированных на основе феррита висмута / И. И. Макоед, А. С. Демеш // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка. – 2024. – №1. – С. 57–67.

39–А. Макоед, И. И. Простая модель поляризуемости катионзамещенного феррита висмута / И. И. Макоед, И. Н. Мельникова, Г. С. Римский // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4. Фізіка. Матэматыка. – 2024. – №2. – С. 84–90.

40–А. Шестаков, М. В. Электрическая поляризация и магнитные свойства цинк-теллуритных стекол, активированных наночастицами магнетита и титаната бария / М. В. Шестаков, И. И. Макоед // Стекло и керамика. – 2025. – Т. 98, № 6. – С. 3–10.

41–А. Magnetite nanoparticles doped with rare earth ions: synthesis, structural, and magnetic properties / A. V. Rutkauskas, O. N. Lis, S. E. Kichanov, E. V. Lukin, B. A. Abdurakhimov, G. S. Rymski, A. L. Zhaludkevich, I. I. Makoev, D. P. Kozlenko, A. Mutali // Journal of Nanoparticle Research. – 2025. – Vol. 27, № 188. – P. 3–10.

Статьи в научных журналах, сборниках трудов, докладов и материалов научных конференций

42–А. Данилькевич, М.И. Электрические свойства оксидных магнитоупорядоченных кристаллов со структурой шпинели и перовскита / М.И. Данилькевич, И.И. Макоед // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии : сб. матер. Междунар. науч.-метод. конф., Брест, 28 – 29 окт. 2003 г. / Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина ; под общ. ред. В.С. Секержицкого. – Брест, 2003. – С. 14–20.

43–А. Диэлектрические и магнитные свойства сегнетомагнетиков $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ / А.Ф. Ревинский, И.И. Макоед, К. Кокошкевич, К.И. Янушкевич, А.И. Галяс // Сегнетоэлектрические материалы : сб. докл. Междунар. научн. - практ. семинара, Минск, 28 – 29 апр. 2004 г. / Минск, БГПУ ; [редкол.: И. С. Ташлыков, Л. Н. Марголин, В. И. Януть]. – Минск, 2004. – С. 25–27.

44–А. Получение и оптические характеристики высокотемпературных ферроэлектромагнетиков $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, И. В. Котов, К. Кокошкевич / Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13 – 15 окт. 2004 г. / редкол.: В.В. Понарядов (отв. ред.) [и др.]. – Мн. : БГУ, 2004. – С. 201–205.

45–А. Электронная структура и магнитные свойства тонкопленочных сегнетомагнетиков $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$. / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, А. И. Галяс, К. И. Янушкевич, К. Кокошкевич, В. Тригук // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 26 – 28 окт. 2005 г., в 2 т. / редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Мн. : Изд. центр БГУ, 2005. – Т. 1. – С. 65–66.

46–А. Химическая связь и физические свойства тонких пленок $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{FeO}_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. Кокошкевич, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, В. В. Тригук // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. II Междунар. науч. конф., Минск, 5 – 6 окт. 2006 г. / редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Мн. : БГУ, 2006. – С. 25–29.

47–А. Технология получения и физические свойства тонких пленок на основе BiFeO_3 / О. Ф. Демиденко, А. И. Галяс, К. И. Янушкевич, А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, Д. А. Кривченя, К. Кокошкевич // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. III Междунар. науч. конф., Минск, 23 – 26 окт. 2007 г., в 3 т. / редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Мн. : Изд. центр БГУ, 2007. – Т. 1. – С. 130–132.

48–А. Фазовый переход Мотта в мультиферроике BiFeO_3 / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, В. В. Тригук, К. Кокошкевич // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. III Междунар. науч. конф., Минск, 23 – 26 окт. 2007 г., в 3 т. / редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2007. – Т. 1. – С. 133–135.

49–А. Распределение спиновой плотности в мультиферроиках системы $\text{La}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$. / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. Кокошкевич, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, В. В. Тригук // Первый Междунар. междисц. симпоз. «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-2007), Ростов-на-Дону, п. Лоо, 5 – 10 сентября 2007 г. : тр. симпоз. – Ростов н/Д : ИПО ПИ ЮФУ, 2007. – С. 142–147.

50–А. Магнитное упорядочение и фазовый переход Мотта в сильнокоррелированной системе BiFeO_3 / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. Кокошкевич, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, В. В. Тригук // 11-й Междунар. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-11, Ростов-на-Дону, п. Лоо, 16 – 21 сентября 2008 г., в 2 т. : тр. симпоз. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. – Т. 2. – С. 77–80.

51–А. Ревинский, А.Ф. АВ-initio расчет фононного спектра BiFeO_3 / А.Ф. Ревинский, В.В. Тригук, И.И. Макоед // Наука. Образование. Технологии-2010 : матер. III Междунар. науч.–практ. конф. Барановичи, 21 – 22 окт. 2010 г. / редкол.: А.В. Никишова (гл. ред.) [и др.] – Барановичи : РИО БарГУ, 2010. – С. 202–204.

52–А. Особенности синтеза, магнитные свойства и размерные эффекты в твердых растворах системы $\text{La}_{1-x}\text{Bi}_x\text{MnO}_3$ / Т. Н. Тарасенко, З. Ф. Кравченко, В. И. Каменев, А. С. Мазур, Т. И. Полек, И. И. Макоед, А. Ф. Ревинский // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ – 2011) : сб. докл. V Междунар. науч. конф., Минск, 18 – 21 октября 2011 г., в 3 т. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. Н. М. Олехнович [и др.]. – Мн. : А. Н. Вараксин, 2011. – Т. 1. – С. 128–131.

53–А. Получение и магнитные свойства мультиферроиков $\text{Re}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ (Re = La, Nd, Gd) / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, В. В. Лозенко, В. В. Тригук // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ – 2011) : сб. докл. V Междунар. науч. конф., Минск, 18 –

21 октября 2011 г., в 3 т. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред. Н. М. Олехнович [и др.]. – Мн. : А. Н. Вараксин, 2011. – Т. 2. – С. 110–112.

54–А. Магнитные свойства мультиферроиков, синтезированных на основе BiFeO_3 / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, А. В. Поддубровская, В. В. Лозенко, В. В. Мощалков // Третий Междунар. симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-3), Ростов-на-Дону, п. Лоо, 4 – 8 сентября 2011 г. : тр. симпоз. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2011. – С. 142–147.

55–А. Диэлектрические и оптические свойства гадолиний замещенного феррита висмута / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, В. В. Лозенко, В. В. Мощалков // Третий Междунар. симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-3), Ростов-на-Дону, п. Лоо, 4 – 8 сентября 2011г. : тр. симпоз. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2011. – С. 148–153.

56–А. Синтез и свойства наноразмерных слоев на основе BiFeO_3 / А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, А. С. Мазур, Г. И. Маковецкий, И. И. Макоед, А. Н. Погорелый, А. Ф. Ревинский, Т. Н. Тарасенко, А. И. Товстолыткин, К. И. Янушкевич // «Наноструктуры в конденсированных средах» : сб. научн. статей / редкол.: П.А. Витязь (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, Минск, 2011. – С. 356–367.

57–А. Диэлектрические свойства тонких пленок мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{FeO}_3$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Nd}, \text{Gd}$) / А.Ф. Ревинский, И.И. Макоед, К.И. Янушкевич, А.И. Галяс, О.Ф. Демиденко, В.Р. Соболев, Т.В. Дубина, М.В. Ярмолич // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии : сб. матер. IV Респ. науч.-метод. конф., Брест, 20 – 21 сент. 2012 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: В. А. Плетюхов, И. И. Макоед, В. С. Секержицкий. – Брест, 2012. – С. 84–86.

58–А. Структурная устойчивость перовскиоподобных мультиферроиков / А.Ф. Ревинский, И.И. Макоед, К.И. Янушкевич, А.И. Галяс, О.Ф. Демиденко, В.Р. Соболев, Т.В. Дубина, А.М. Панасевич // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии: сб. матер. IV Респ. науч.-метод. конф., Брест, 20 – 21 сент. 2012 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: В. А. Плетюхов, И. И. Макоед, В. С. Секержицкий. – Брест : БрГУ, 2012. – С. 80–83.

59–А. Magnetoelectric coupling and lattice dynamics of Gd-doped BiFeO_3 multiferroics / V. V. Tryhuk, A. F. Ravinski, I. I. Makoed, V. V. Lazenka, K. I. Januszkiewicz // Оксидні матеріали електронної техніки – отримання, властивості, застосування (ОМЕЕ-2012) : зб. матер. міжнар. наук. конф., Львів, 3 – 7 вересня 2012 р. / – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – С. 253–254.

60–А. Диэлектрические свойства тонких пленок мультиферроиков $\text{R}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Gd}$) / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, Т. В. Дубина, Т. Лукашевич, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, В. В. Лозенко, В. В. Мощалков // 15-й Междунар. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства

оксидов» ODPO-15, Ростов-на-Дону, п. Лоо, 7 – 12 сентября 2012 г. : тр. симпоз. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2012. – С. 261–263.

61–А. Слабый ферромагнетизм и распределение спиновой плотности в тонких пленках мультиферроиков $Gd_xV_{1-x}FeO_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, В. В. Тригук, В.В. Лозенко, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О.Ф. Демиденко, А.М. Панасевич, В.В. Моцалков // 16-й Междунар. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-16, Ростов-на-Дону – г. Туапсе, 7 – 12 сентября 2013 г.: тр. симпоз. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2013. – Т. 2, вып. 16. – С. 68–72.

62–А. Анищик, В. М. Кристаллохимические аспекты получения мультиферроиков на основе феррита висмута / В. М. Анищик, И. И. Макоед / Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VI Междунар. науч. конф., Минск, 8 – 9 окт. 2014 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2014. – С. 29–32.

63–А. Рамановская спектроскопия концентрационного структурного перехода в мультиферроиках $Dy_xV_{1-x}FeO_3$ / А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед, В. М. Анищик, В. В. Лозенко, К. И. Янушкевич, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, А. М. Панасевич, Д. Денкова, В. В. Моцалков // 17-й Междунар. симпоз. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-17, Ростов-на-Дону – Москва - пос. Южный, 5 – 10 сентября 2014 г.: тр. симпоз., в 3 т. – Ростов н/Д: Изд-во Фонд науки и образования, 2014. – Т. 1. – С. 250–253.

64–А. Оптическая спектроскопия мультиферроиков $RBiFeO_3$ / И.И. Макоед, А. Ф. Ревинский, В. М. Анищик, В. В. Лозенко, Н. Вереллен, Й. Ванакен, В. В. Моцалков / Пятый Междунар. междисц. Симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-5), Ростов-на-Дону- п. Южный, 15 – 19 сентября 2015 г.: тр. симпоз. – Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2015. – Вып. 5. – С. 71–74.

65–А. Тригук, В. В. Распределение электронной плотности и несобственная электронная поляризация в мультиферроике $SmFeO_3$ / В. В. Тригук, А. Ф. Ревинский, И. И. Макоед // Пятый Междунар. междисц. симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-5), Ростов-на-Дону- п. Южный, 15 – 19 сентября 2015 г. : тр. симпоз. – Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2015. – Вып. 5. – С. 102–106.

66–А. Проходцов, А.И. Механические свойства катионзамещенных ферритов шпинелей / А.И. Проходцов., И.И. Макоед // Молодежь в науке – 2015. Приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». – 2016. – Ч. 4. – С. 64– 68.

67–А. Влияние содопирования на магнитные свойства феррита висмута / И. И. Макоед В. М. Анищик, А. Ф. Ревинский, К. И. Янушкевич, А. М. Живулько, В. Д. Живулько, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, Д. А. Кривченя, В. В. Лозенко, В. В. Моцалков // 19-й Междунар. междисц. симпозиум «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-19, Ростов-на-Дону – Москва - пос. Южный, 5 – 10 сентября 2016 г. : тр. симпоз. – Ростов-на-Дону : Фонд науки и образования, 2016 г. – Вып. 19. – С. 105–108.

68–А. Магнитные свойства тонких пленок катион-замещенного феррита висмута / И. И. Макоед, А. И. Галяс, О. Ф. Демиденко, А. М. Живулько, В. В. Лозенко, А. Ф. Ревинский, К. И. Янушкевич // Наноструктуры в конденсированных средах / Сб. науч. статей по материалам конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (ФНС-2016) // Мн. : Изд. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 2016. – С. 211–218.

69–А. Электронная поляризуемость и оптические свойства катион-замещенного феррита висмута / И. И. Макоед, В. М. Анищик, А. Ф. Ревинский, А. М. Живулько // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 22 – 25 нояб. 2016 г., в 3 т. / ГНПО «ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению» ; редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2016. –Т. 1. – С. 61–63.

70–А. Макоед, И. И. О роли взаимодействия Дзялошинского-Мория в формировании магнитной структуры мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$ / И. И. Макоед, В. В. Тригук, А. Ф. Ревинский // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф., 22 – 25 нояб. 2016 г., в 3 т. / ГНПО «ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению» ; редкол.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Мн. : Ковчег, 2016. –Т. 1. – С. 127–129.

71–А. Макоед, И. И. Диэлектрические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{0.80}\text{Gd}_{0.20-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ / И. И. Макоед, А. Ф. Ревинский, Н. И. Горбачук, А. В. Пащенко, Н. А. Леденев, А. А. Амиров, Д. М. Юсупов, Д. Д. Татарчук, Ю. В. Диденко, К. И. Янушкевич / Шестой Междунар. междисц. симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Mutiferroics-6), Ростов-на-Дону - п. Южный, 15 – 19 сентября 2017 г., в 3 т. : тр. симпоз. – Ростов-на-Дону- п. Южный : Фонд науки и образования, 2017. – Вып. 6. – Т. 1. – С. 53–56.

72–А. Леденев, Н. А. Влияние висмута на структуру, магнитные и магниторезистивные свойства редкоземельных манганитов $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3-x}\text{Bi}_x\text{Mn}_{1.1}\text{O}_{3-\delta}$ / Н. А. Леденёв, А. В. Пащенко, В. П. Пащенко, В. К. Прокопенко, А. В. Возняк, Д. Д. Татарчук, Ю. В. Диденко, А. И. Гудименко, В. П. Кладько, Е. Н. Хацько, И. И. Макоед, А. С. Пилипчук / Шестой Междунар. междисц. симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Mutiferroics-6), Ростов-на-Дону - п. Южный, 15 – 19 сент. 2017 г., в 3 т. : тр. симпоз. – Ростов-на-Дону- п. Южный: Фонд науки и образования, 2017. – Вып. 6. – Т. 1. – С. 36–39.

73–А. Кристаллохимические аспекты получения мультиферроиков на основе ферритов со структурой шпинели и граната / И.И. Макоед // Менделеевские чтения 2019 : сб. матер. Республ. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию, Брест, 22 февр. 2019 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина ; редкол.: Э. А. Тур, Н. Ю. Колбас, В. В. Коваленко; под общ. ред. Н. Ю. Колбас. – Брест : БрГУ, 2019. – С. 105–108.

74–А. Макоед, И. И. Оптические свойства мультиферроиков $\text{Bi}_{0.80}\text{Gd}_{0.20-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // Материалы и структуры современной электроники : матер. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14 – 16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БГУ, 2020. – С. 88–92.

75–А. Макоед И. И. Диэлектрическая, импедансная и модульная спектроскопия поликристаллов, синтезированных на основе феррита висмута / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Материалы и структуры современной электроники : матер. X Междунар. науч. конф., Минск, 12 – 14 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]*. – Мн. : БГУ, 2022. – С. 138–142.

76–А. Макоед, И. И. Использование компьютерного эксперимента при изучении поляризации диэлектриков / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Физико-математическое образование: цели, достижения и перспективы [Электр. ресурс] : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 окт. 2022 г. / Белорус. гос. пед. ун-т ; редкол.: С. И. Василец [и др.]*. – Минск : БГПУ, 2022. – С. 251–254. Режим доступа: <https://elib.bspu.by/bitstreams/d76d2b31-d186-49f7-8502-ac5d13d6ffbe/download> Дата доступа : 10.11.2025.

77–А. Макоед, И. И. Импедансная спектроскопия поликристаллов, синтезированных на основе ортоферрита лантана / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Физико-математическое образование: цели, достижения и перспективы [Электр. ресурс] : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20 – 21 окт. 2022 г. / Белорус. гос. пед. ун-т ; редкол.: С. И. Василец [и др.]*. – Минск : БГПУ, 2022. – С. 255–258. Режим доступа: <https://elib.bspu.by/bitstreams/9b8819d4-4887-401b-b3d8-b96f0d0fe4b/download>. Дата доступа: 10.11.2025.

78–А. Применение редкоземельных элементов в технических изделиях / П. А. Витязь, В. М. Федосюк, И. И. Макоед, К. И. Янушкевич // *Наука и инновации*. – 2023. – № 6 (244). – С. 58–65.

79–А. Диэлектрические свойства катионзамещенного редкоземельными элементами феррита висмута / П. А. Витязь, В. М. Федосюк, И. И. Макоед, Ж. Шерматов, М. Пайзулахханов, А. М. Живулько, К. И. Янушкевич // *Наука и инновации*. – 2023. – №7 (245). – С. 47–53.

80–А. Диэлектрическая спектроскопия электронных состояний в катионзамещенном феррите висмута / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Перспективные материалы и технологии : матер. Междунар. научн. – практ. конф., Витебск, 21 – 25 авг. 2023 г. / под ред. В. В. Рубаника*. – Мн. : ИВС Минфина, 2023. – С. 256–266.

81–А. Влияние условий синтеза на структуру и магнитные свойства Ni-замещенного феррита висмута / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. X Междунар. научн. конф., Минск, 22 – 26 мая 2023 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» ; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]*. Мн. : А. Н. Вараксин, 2023. – Т. 1. – С. 164–167.

82–А. Влияние условий синтеза на структуру и фазовую чистоту образцов Zn-замещенного феррита висмута висмута / И. И. Макоед, Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. X Междунар. научн. конф., Минск, 22 – 26 мая 2023 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» ; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]*. Мн. : А. Н. Вараксин, 2023. – Т.1. – С. 303–306.

83–А. Компьютерная обработка рамановских спектров тонких пленок соединений, синтезированных на основе ViFeO_3 / И. И. Макоед, Е. К. Зыбайло, Т. А. Березовская, К. И. Янушкевич // Менделеевские чтения – 2024 [Электр. ресурс] : электрон. сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию, Брест, 22 февр. 2024 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: Е. Г. Артемук (отв. ред.), Н. С. Ступень. – Брест : БрГУ, 2024. – С. 135 – 139. Режим доступа: <https://rep.brsu.by/bitstream/handle/123456789/10067/Менделеевские%20чтения%202024.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Дата доступа: 10.11.2025.

84–А. Синтез, кристаллическая структура и магнитные свойства допированного лютецием магнетита $\text{Lu:Fe}_3\text{O}_4$ / Г. С. Римский, А. Л. Желудкевич, А. В. Руткаускас, И. И. Макоед // Свиридовские чтения – 2024: матер. X Междунар. конф. по химии и химическому образованию, Минск, 9 – 12 апр. 2024 г. – Минск : БГУ, 2024. – С. 53 – 56.

85–А. Кристаллическая структура и магнитные свойства допированного диспрозием магнетита / Г. С. Римский, А. Л. Желудкевич, И. И. Макоед, А. В. Руткаускас // Мультиферроики: получение, свойства, применение: матер. Междунар. научн. -практ. конф. : Витебск, 24 – 27 сентября 2024 г. / под. ред. В.В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2024. – С. 70 – 72.

86–А. Магнитные свойства никель- и кобальт-цинковых ферритов $\text{Me}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($\text{Me} = \text{Ni}, \text{Co}$) / Г. С. Римский, А. Л. Желудкевич, И. И. Макоед, Доан Фан Тао Тиен // Мультиферроики: получение, свойства, применение: матер. Междунар. научн. -практ. конф.: Витебск, 24 – 27 сентября 2024 г. / под. ред. В. В. Рубаника. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2024. – С. 67 – 69.

87–А. Моделирование электрокалорического эффекта в феррите висмута / И. И. Макоед, А. М. Петрусевич, Е. К. Зыбайло, Г. С Римский // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики (АПФЭЭ-2024) [Сайт] : эл. сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой ; редкол.: В. А. Богуш (пред.) [и др.]. – Новополоцк, 2025. – С. 102–106. Режим доступа: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/47371/1/102-106.pdf>. Дата доступа: 10.11.2025.

88–А. Моделирование магнитокалорического эффекта в катионзамещенном феррите висмута / И. И. Макоед, А. М. Петрусевич, Е. К. Зыбайло, Г. С. Римский // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики (АПФЭЭ-2024) [Сайт] : эл. сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой ; редкол.: В. А. Богуш (пред.) [и др.]. – Новополоцк, 2025. – С. 107–112. Режим доступа: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/47372/1/107-112.pdf>. Дата доступа: 10.11.2025.

РЭЗІЮМЭ

Макаед Ігар Іванавіч

Спін-зарадавыя спарадкаваныя станы і магнітаэлектрычныя ўзаемадзеянні ў мультыфероіках са структурай шпінелі і пераўскіту

Ключавыя словы: шпінель, пераўскіт, ферыт вісмута, катыённае замяшчэнне, крышталічная структура, дыэлектрычныя функцыі, магнітакаларычны эфект, магнітаэлектрычны эфект.

Мэта працы: устанаўленне механізмаў фарміравання і ўзаемадзеяння ўпарадкаваных спінавых і зарадавых станаў у мультыфероіках са структурай шпінелі і пераўскіту.

Метады даследавання: метады рэнтгенаўскай дыфракцыі, магнітаметра, дыэлектрычная і раманаўская спектраскапія, магнітная сілавая мікраскапія, сканіравальная электронная мікраскапія.

Асноўныя вынікі: распрацавана метадыка і сінтэзаваны ўзоры са структурай шпінелі і пераўскіту. Устаноўлены заканамернасці структурнага, частотнага і тэмпературнага змянення дыэлектрычных і аптычных уласцівасцяў на падставе вынікаў шырокадыяпазоннай дыэлектрычнай спектраскапіі, вынікаў вывучэння петляў с'ягнетаэлектрычнага гістарэзісу. Устаноўлены заканамернасці структурнай і тэмпературнай змены дынамікі крышталічнай рашоткі на падставе вынікаў раманаўскай спектраскапіі. Устаноўлены заканамернасці структурнай і тэмпературнай змены магнітных уласцівасцяў на падставе вынікаў эксперыментальнага даследавання тэмпературных і палявых залежнасцяў велічынь удзельных намагнічанасцяў, вынікаў вывучэння петляў магнітнага гістарэзісу. Устаноўлены заканамернасці структурнай і тэмпературнай змены дыэлектрычных, аптычных і магнітных уласцівасцей BiFeO_3 , SmFeO_3 , $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$ на падставе вынікаў эксперыментальнага даследавання і першапрынцыповых разлікаў функцый размеркавання электроннай і спінавой шчыльнасцей. Устаноўлены абсалютныя велічыні характарыстык магнітакаларычнага і электракаларычнага эфектаў, якія назіраюцца пры тэмпературах фазавых пераходаў, абумоўленых спінавай пераарыентацыяй і дыэлектрычнай палярызацыяй BiFeO_3 на падставе вынікаў эксперыментальнага даследавання і дадзеных камп'ютарнага мадэлявання.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі дысертацыйнай працы могуць быць выкарыстаны пры пошуку і распрацоўцы новых матэрыялаў са структурнай шпінелі і пераўскіта з зададзенымі функцыянальнымі ўласцівасцямі для прымянення ў якасці элементнай базы электронных прылад запісу і захоўвання інфармацыі.

Галіна прымянення: спінтроніка, мікра- і радыёэлектроніка, прыборабудаванне.

РЕЗЮМЕ

Макоед Игорь Иванович

Спин-зарядовые упорядоченные состояния и магнитоэлектрические взаимодействия в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита

Ключевые слова: шпинель, перовскит, феррит висмута, катионное замещение, кристаллическая структура, диэлектрические функции, магнитокалорический эффект, магнитоэлектрический эффект.

Цель работы: установление механизмов формирования и взаимодействия упорядоченных спиновых и зарядовых состояний в мультиферроиках со структурой шпинели и перовскита.

Методы исследования: методы рентгеновской дифракции, магнитометрия, диэлектрическая и рамановская спектроскопия, магнитная силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

Основные результаты: разработана методика и синтезированы образцы со структурой шпинели и перовскита. Установлены закономерности структурных, частотных и температурных изменений диэлектрических и оптических свойств на основе результатов широкодиапазонной диэлектрической спектроскопии, результатов исследования петель сегнетоэлектрического гистерезиса. Установлены закономерности структурных и температурных изменений динамики кристаллической решетки на основе результатов спектроскопии комбинационного рассеяния света. Установлены закономерности структурных и температурных изменений магнитных свойств на основе результатов экспериментального исследования температурных и полевых зависимостей удельных намагниченностей, результатов исследования петель магнитного гистерезиса. Установлены закономерности структурного и температурного изменения диэлектрических, оптических и магнитных свойств BiFeO_3 , SmFeO_3 , $\text{Bi}_{0,75}\text{Sm}_{0,25}\text{FeO}_3$ на основании результатов экспериментального исследования и первопринципных расчетов функций распределения электронной и спиновой плотностей. Установлены абсолютные значения характеристик магнитокалорического и электрокалорического эффектов, наблюдаемых при температурах фазовых переходов, вызванных переориентацией спинов и диэлектрической поляризацией BiFeO_3 на основе результатов экспериментального исследования и данных компьютерного моделирования.

Рекомендации по использованию: Результаты диссертационной работы могут быть использованы при поиске и разработке новых материалов со структурой шпинели и перовскита с заданными функциональными свойствами для применения в качестве элементной базы электронных устройств записи и хранения информации.

Область применения: спинтроника, микро- и радиоэлектроника, приборостроение.

SUMMARY

Makoed Igor Ivanovich

Spin-charge ordered states and magnetoelectric interactions in multiferroics with spinel and perovskite structures

Keywords: spinel, perovskite, bismuth ferrite, cation substitution, crystal structure, dielectric functions, magnetocaloric effect, magnetoelectric effect.

Aim of the research: is to establish the mechanisms of formation and interaction of ordered spin and charge states in multiferroics with spinel and perovskite structures.

Methods of research: X-ray diffraction methods, magnetometry, dielectric and Raman spectroscopy, magnetic force microscopy, scanning electron microscopy.

Obtained results and novelty: the technique was developed, and samples with spinel and perovskite structures were synthesized. The patterns of structural, frequency, and temperature changes in the dielectric and optical properties were established based on the results of wide-range dielectric spectroscopy and the results of studying ferroelectric hysteresis loops. The patterns of structural and temperature changes in the dynamics of the crystal lattice were established based on the results of Raman spectroscopy. The patterns of structural and temperature changes in the magnetic properties were established based on the results of an experimental study of the temperature and field dependences of specific magnetizations and the results of studying magnetic hysteresis loops. The regularities of structural and temperature changes in the dielectric, optical and magnetic properties of BiFeO_3 , SmFeO_3 , $\text{Bi}_{0.75}\text{Sm}_{0.25}\text{FeO}_3$ were established based on the results of an experimental study and first-principles calculations of the distribution functions of electron and spin densities. The absolute values of the characteristics of the magnetocaloric and electrocaloric effects observed at the temperatures of phase transitions caused by spin reorientation and dielectric polarization of BiFeO_3 were established based on the results of an experimental study and computer modeling data.

Recommendations for use: the results of the dissertation work can be used in the search and development of new materials with the structure of spinel and perovskite with specified functional properties for use as an elemental base for electronic devices for recording and storing information.

Application area: spintronics, micro- and radioelectronics, instrumentation.



Научное издание

Макоед Игорь Иванович

**СПИН-ЗАРЯДОВЫЕ УПОРЯДОЧЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ
И МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В МУЛЬТИФЕРРОИКАХ СО СТРУКТУРОЙ
ШПИНЕЛИ И ПЕРОВСКИТА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния