

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Макс

Максутова Филюза Абдрахимовна

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ОКРЕСТНОСТИ
МАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПЛЕНКАХ ТИПА
ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа-2019

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физико-технического института в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Башкирский государственный университет».

Научный руководитель: **Гареева Зухра Владимировна**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией теоретической физики, ведущий научный сотрудник Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН

Официальные оппоненты: **Ерёмина Рушана Михайловна**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Казанского ФТИ им. Е. К. Завойского – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН

Загребин Михаил Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН

Защита состоится « 26 » декабря 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.080.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, расположенном по адресу: 450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39, ученому секретарю диссертационного совета. Факс: +7 (347) 282-37-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИПСМ РАН по адресу: <http://www.imsr.ru/>

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета.

доктор физико-математических наук



Имаев Марсель Фанирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики с магнитными и электрическими неоднородностями привлекают активный интерес исследователей, что связано с широкими перспективами их технологических приложений в спинтронике, информационных и энергосберегающих технологиях, а также с возможностью обнаружения новых фундаментальных физических эффектов [1- 14].

Важным аспектом изучения магнитоэлектрических свойств мультиферроидных материалов является анализ механизмов магнитоэлектрических эффектов, за счет которых осуществляется перестройка магнитоэлектрических структур под действием магнитного и электрического полей.

Мультиферроики - материалы, кристаллическая структура которых допускает сосуществование электрического и магнитного упорядочения. В таких средах возможна реализация различных видов магнитоэлектрических эффектов: линейного, квадратичного, нелинейных эффектов более высокого порядка по электрическому и магнитному полю, а также неоднородных магнитоэлектрических эффектов (МЭЭ), связанных с пространственной неоднородностью намагниченности и электрической поляризации.

К мультиферроидным материалам относятся ферриты-гранаты, в которых в эксперименте [1] уже в 60-х годах прошлого столетия впервые показано проявление магнитоэлектрического эффекта. Дальнейшие исследования в этой области, показали, что в иттриевом феррите-гранате при очень низких температурах наблюдается квадратичный магнитоэлектрический эффект [2]. В последующие годы появилось сообщение об обнаружении линейного магнитоэлектрического эффекта аномально большой величины в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов

[3]. Так же в этих пленках был обнаружен неоднородный магнитоэлектрический эффект. Контролируемое электрическим полем смещение магнитных доменных границ наблюдалось в [8]. Результаты экспериментальных и теоретических исследований [8-12] показывают, что пленки ферритов-гранатов обладают магнитоэлектрическими свойствами, и изучение возможностей проявления магнитоэлектрических эффектов в этих материалах является **актуальной задачей**. Актуальность исследований обеспечивается возможностью использования магнитоэлектрических свойств пленок ферритов – гранатов для разработки энергосберегающих устройств записи и считывания информации на основе новых функциональных материалов со свойствами мультиферроиков. Несмотря на обширный экспериментальный и теоретический материал [8-12] ряд вопросов, связанных с проявлением магнитоэлектрических свойств ферритов – гранатов, centrosymmetric кристаллов с пространственной группой симметрии O_h^{10} и пониманием механизмов МЭЭ требуют дополнительного исследования.

Цель работы и задачи.

Целью настоящей работы является изучение проявления различных механизмов неоднородных магнитоэлектрических эффектов в ферромагнитных пленках с параметрами ферритов – гранатов, а также расчет электрической поляризации в области магнитных неоднородностей вида 180° , 90° и 0° доменных границ.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование магнитоэлектрических свойств двухслойных систем с магнитной неоднородностью, реализующейся в области границы раздела слоев из-за различия магнитной анизотропии слоев.

2. Выяснение влияния кубической анизотропии на магнитные и электрические свойства двухслойной обменно – связанной пленки при

ферромагнитном и антиферромагнитном упорядочении спинов в окрестности границы раздела.

3. Расчет возможных микромагнитных конфигураций и сопутствующей электрической поляризации в двухслойной ферромагнитной пленке с магнитной анизотропией слоев типа «легкая ось», «легкая плоскость»

4. Исследование механизмов магнитоэлектрических взаимодействий редкоземельных (РЗ) ферритов – гранатов и расчет электрической поляризации, обусловленной электро-дипольными моментами РЗ ионов.

5. Анализ изменения топологии 180° доменной границы и её электрической поляризации в зависимости от неоднородного электрического поля в пленках редкоземельных ферритов -гранатов.

6. Изучение возможных микромагнитных структур, возникающих в неоднородном электрическом поле, и их свойств в магнитоодноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1) Впервые исследована электрическая поляризация двухслойной обменно-связанной ферромагнитной структуре с ферро- и антиферромагнитным взаимодействием спинов на границе раздела с учетом кубической анизотропии пленок.

2) Обнаружено, что учет кубической магнитной анизотропии выделяет направление электрической поляризации. Показано, что переключение электрической поляризации пленок может осуществляться за счет магнитного поля, приложенного в направлении оси трудного намагничивания.

3) Впервые рассчитаны магнитные конфигурации блоховского, неелевского и смешанного типов в двухслойной ферромагнитной структуре с антиферромагнитным упорядочением спинов на границе раздела, исследована электрическая поляризация, возникающая в окрестности магнитных неоднородностей данных типов.

- 4) Развита теоретическая модель, показывающая, что электрическая поляризация реализуется в пленках ферритов-гранатов в окрестности 180° блоховских доменных границ.
- 5) Впервые исследованы электрические свойства возможных микромагнитных структур, возникающих в ферромагнитных пленках с одноосной магнитной анизотропией при локальном воздействии электрического поля на определенные участки её поверхности.
- 6) Впервые выявлен вклад парциальных частей неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, обусловленных наличием в них $\text{div}\mathbf{m}$ и $\text{rot}\mathbf{m}$, на электрические свойства микромагнитных структур, возникающих под действием локального электрического поля в одноосных ферромагнитных пленках.
- 7) Впервые показано, что в неоднородном электрическом поле в одноосных ферромагнитных пленках возможно возникновение двух видов 0° ДГ: с квазиблоховской структурой и неелевского типа.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты проведенных исследований представляют интерес для физики конденсированного состояния, теории магнетизма и магнитоэлектрических явлений. Микромагнитные объекты, обладающие магнитоэлектрическими свойствами, широко применяются в мобильной электронике, беспроводных датчиках, в спинтронике.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования неоднородного магнитоэлектрического эффекта в двухслойных обменно – связанных ферромагнитных пленках с различной магнитной анизотропией слоев. Индуцированный магнитным полем $\mathbf{H}$ поворот вектора электрической поляризации $\mathbf{P}$ в двухслойной ферромагнитной пленке.

2. Особенности реализации магнитоэлектрического эффекта в двухслойных ферромагнитных пленках при различном характере межслойного обменного взаимодействия в области интерфейса.
3. Выделение определенного направления электрической поляризации в двухслойных обменно – связанных ферромагнитных пленках за счет кубической магнитной анизотропии.
4. Результаты расчета электрической поляризации, индуцируемой неоднородным магнитным полем, обусловленным взаимодействием РЗ и Fe подсистем в пленках редкоземельных ферритов - гранатов в окрестности 180° блоховских доменных границ в рамках концепции полярного магнитоэлектрического эффекта.
5. Особенности проявления флексомагнитоэлектрического эффекта в магнитоодноосных пленках с параметрами ферритов – гранатов при локальном воздействии электрического поля на определенные участки её поверхности. Результаты расчета трансформации структуры 180° доменной границы (ДГ) и возникающей в ее окрестности электрической поляризации под действием неоднородного электрического поля.
6. Выявление возможности зарождения 0° доменных границ с неблоховской структурой под действием электрического поля. Определение вклада парциальных частей неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, обусловленных наличием в них $div\mathbf{m}$ и $rot\mathbf{m}$, в рассматриваемые явления.

Апробация результатов

Основные результаты, изложенные в данной работе, были представлены на следующих конференциях:

1. II Всероссийская научная молодежная конференция «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа, 2014г.
2. Вторая межрегиональная школа-конференция «Теоретические и экспериментальные исследования в конденсированных средах», Уфа, 2015г.

3. XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2015 г.

4. VIII Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», Уфа, 2015г.

5. III Всероссийская научная молодежная конференция «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа, 2015 г.

6. Всероссийская научно-практическая конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Ш.Х. Чанбарисова, г. Уфа, 2016 г.

7. Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017). 1 – 5 July 2017, Moscow.

8. Международного семинара «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». 5-9 сентября 2017 г., Институт физики имени Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, г. Махачкала.

9. V Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием «Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники».

10. Новое в магнетизме и магнитных материалах-XXIII, г. Москва.

11. Всероссийская конференция-школа с международным участием «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах», 22–25 мая 2019 г., на базе Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН.

12. EASTMAG -2019, VII Euro - Asian Symposium "Trends in MAGnetism", september 08–13, 2019, Ekaterinburg, Russia.

Связь работы с научными программами и темами

Работа выполнялась в рамках конкурса на лучшие научные проекты, выполняемые молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях РФ, при поддержке гранта РФФИ: *мол_нр*

№19-32-50020, 2019 г. «Особенности взаимодействия магнитных доменных границ с электрическим полем в ферромагнетиках флексомагнитоэлектрическим эффектом» (руководитель проекта: Пятаков А.П.), а также при поддержке гранта РФФИ А №16-02-00336, 2016 г. «Магнитоэлектрическое управление микромагнитными структурами в пленках оксидных мультиферроиков» (руководитель проекта: Гареева З.В.).

Публикации

Основные результаты работы отражены в 26 публикациях, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах и 20 публикациях в сборниках тезисов докладов и трудов международных и всероссийских конференций.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов теории микромагнетизма и численных методов, обоснованностью сделанных допущений, совпадением предельных переходов с известными ранее результатами, а также с качественным согласием с экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит в проведении численных расчетов неоднородных магнитных структур и сопутствующей электрической поляризации в двухслойной ферромагнитной пленке, пленках ферритов - гранатов и одноосных ферромагнетиков с флексомагнитоэлектрическим эффектом, в анализе полученных результатов. Содержание диссертации, основные результаты и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Обсуждение результатов исследований, подготовка публикаций осуществлялись совместно с соавторами.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 101 страниц, включающих 38 рисунков и 2 таблицы. Библиография содержит 106 наименований.

Краткое содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы и ее практической значимости, сформулированы цели работы, ее научная новизна и приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор литературы, посвященный современным аспектам исследований магнитоэлектрических материалов и мультиферроиков. Рассмотрены основные механизмы магнитоэлектрических эффектов (МЭЭ), приведена их классификация. Обсуждаются особенности кристаллической, магнитной структуры, основных магнитных состояний ферритов-гранатов (ФГ), обосновывается выбор этих материалов в качестве модельного объекта исследования. Приводятся разработанные ранее теоретические модели для объяснения МЭЭ в ФГ, а также результаты экспериментальных исследований МЭЭ в кристаллах и пленках ФГ.

Во **второй главе** исследован неоднородный магнитоэлектрический эффект, проявляющийся в области границы раздела двухслойной обменно – связанной ферромагнитной пленки. Определена электрическая поляризация, реализующаяся на магнитной неоднородности, формируемой за счет разной магнитной анизотропии слоев («легкая ось» – «легкая плоскость»), рассмотрен случай ферромагнитного упорядочения в окрестности границы раздела. Исследовано влияние внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости пленки и по нормали к поверхности пленки, на процессы намагничивания пленки, тип магнитной неоднородности и электрическую поляризацию.

Показано, что распределение электрической поляризации по толщине пленки зависит от внутренних и внешних параметров системы: размеров слоев, параметров обменных взаимодействий, ростовой и кубической магнитной анизотропии, а также внешнего магнитного поля. При отсутствии магнитного поля электрическая поляризация $\mathbf{P} = \check{\mathbf{P}}/\chi_e\gamma$ достигает максимальных значений в области границы раздела слоев и уменьшается при повышении магнитного поля.

Исследованы особенности электрической поляризации системы, обусловленные влиянием кубической анизотропии, при изменении величины и направления приложенного магнитного поля в зависимости от соотношений констант наведенной магнитной анизотропии. Обнаружено, что при учете кубической анизотропии выделяется направление вектора электрической поляризации, что важно для процессов переключения электрической поляризации под действием магнитного поля. При увеличении магнитного поля, приложенного вдоль направления оси «трудного намагничивания» [010], компоненты локальной электрической поляризации изменяется неравноценно, что говорит о развороте вектора поляризации. Индуцированный магнитным полем поворот поляризации обусловлен кубической анизотропией пленки (Рис.1). Наблюдаемое поведение электрической поляризации объясняется процессами намагничивания под действием приложенного магнитного поля.

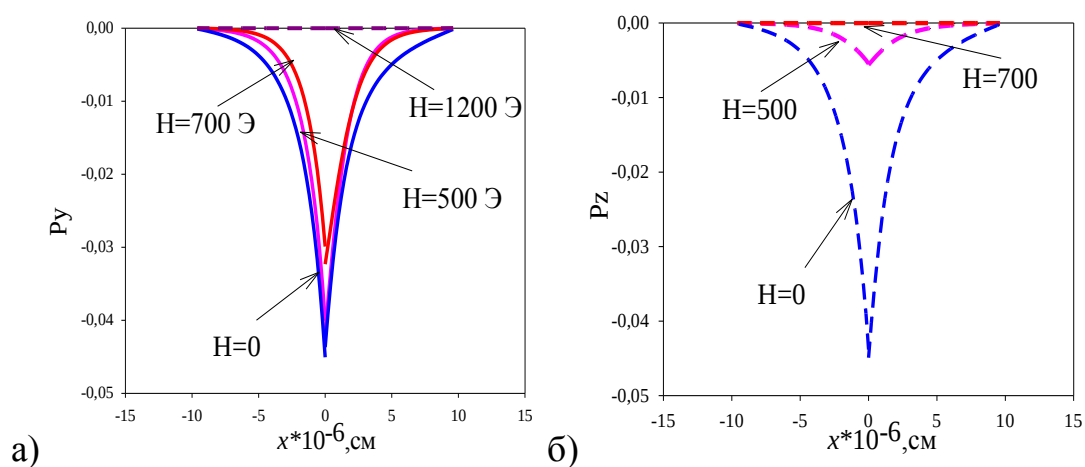


Рис.1. Дифференциальная зависимость компонент поляризации P от координаты:

а) P_y ; б) P_z .

Рассчитаны $P - H$ диаграммы - графики зависимостей интегральной поляризации $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$, $P_i = \int_{d_1}^{d_2} p_i dz$, ($i=y,z$) от магнитного поля при разных значениях констант магнитной анизотропии (Рис.2).

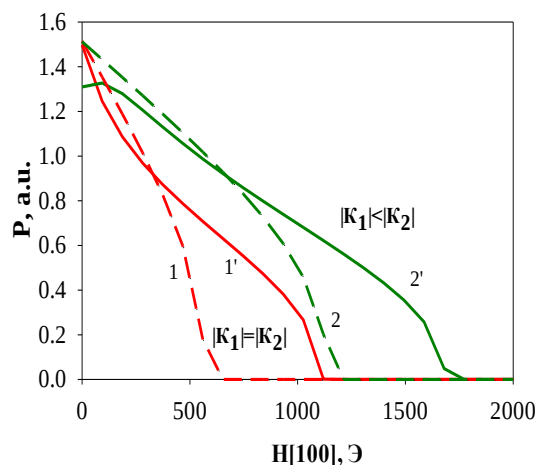


Рис.2. Интегральная зависимость электрической поляризации от H при разных соотношениях констант одноосной анизотропии для $H \parallel [100]$. Кривая 1 – $K_1 = 2 \cdot 10^4$ Эрг/см³, $K_2 = -2 \cdot 10^4$ Эрг/см³, кривая 2 – $K_1 = 2 \cdot 10^4$ Эрг/см³, $K_2 = -4 \cdot 10^4$ Эрг/см³ ($K_c = -10^3$ Эрг/см³, пунктирные линии). Кривые 1', 2' построены для тех же соотношений K_1 , K_2 ($K_c = -2 \cdot 10^4$ Эрг/см³, сплошные линии).

Изменение константы магнитной анизотропии типа «легкая плоскость» K_2 изменяет положение зависимостей $P(x)$. При уменьшении величины K_2 величина порогового магнитного поля, при котором поляризация принимает нулевые значения, понижается. Увеличение константы кубической анизотропии приводит к тому, что экстремум электрической поляризации сдвигается в область более высоких магнитных полей. После достижения максимального значения при дальнейшем увеличении магнитного поля электрическая поляризация понижается вплоть до ее исчезновения при пороговых значениях H . Уменьшение величины константы кубической магнитной анизотропии приводит к понижению величины порогового магнитного поля, подавляющего электрическую поляризацию (Рис.2).

В пленках с кубической анизотропией и коэрцитивностью возникает принципиальная возможность изменять направление поляризации P и соответственно намагниченности M в слоях электрическим полем.

В третьей главе исследовано влияние магнитного поля на электрическую поляризацию и магнитное упорядочение двухслойной ферромагнитной пленки с антиферромагнитным взаимодействием спинов на границе раздела сред. Рассмотрено два основных случая: магнитное поле

направлено вдоль оси легкого намагничивания $[011]$, магнитное поле приложено вдоль оси трудного намагничивания $[100]$ в (001) – ориентированной ФГ - пленке. Обнаружены особенности зависимостей $P(H)$, когда поле H направлено по оси $[011]$ и константа анизотропии типа «легкая плоскость» больше константы анизотропии типа «легкая ось» ($K_2 > K_1$). Полная поляризация в определенном интервале магнитных полей ($15 \text{ кЭ} < H < 42 \text{ кЭ}$) немонотонно убывает. В этой области полярный угол θ изменяется (рис.3), по этой причине наблюдается резкий спад и увеличение поляризации (образуется «яма»). Увеличив константу K_1 , можно добиться монотонного убывания полной поляризации.

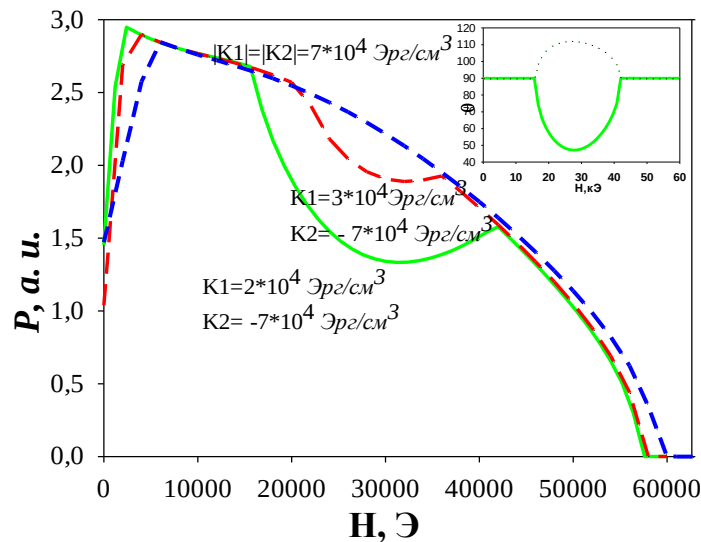


Рис.3. Зависимость интегральной поляризации от $H \parallel [011]$ при разных соотношениях между константами одноосной анизотропии.

В случае антиферромагнитного упорядочивания спинов в области границ раздела сред могут быть реализованы различные магнитные конфигурации при определенных значениях магнитного поля за счет вклада кубической анизотропии. При определенных значениях магнитного поля реализуются магнитные конфигурации неелевского, блоховского или смешанного неель – блоховского типа.

При приложении магнитного поля по оси $[011]$, когда константа кубической анизотропии $K_c = -500 \text{ Эрг/см}^3$, абсолютная величина электрической поляризации в определенном интервале магнитных полей принимает нулевые значения. Существует две области нулевых значений электрической поляризации. В первой области на границе раздела сред наблюдается блоховский тип разворота намагниченности, а во второй области наблюдается однородное распределение намагниченности при очень высоких значениях поля. На кривых 1, 2 возникают области, соответствующие неелевскому типу разворота намагниченности ($\theta = 90^\circ$).

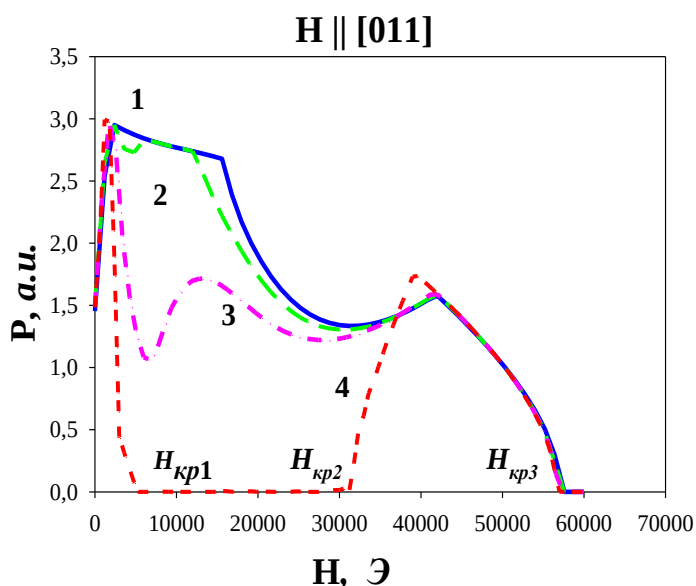


Рис.4. Зависимость интегральной поляризации от $H \parallel [100]$ при разных значениях константы кубической анизотропии: б) кривая 1- $K_c = -2 \cdot 10^4 \text{ Эрг/см}^3$, кривая 2- $K_c = -1 \cdot 10^4 \text{ Эрг/см}^3$, кривая 3- $K_c = -5 \cdot 10^3 \text{ Эрг/см}^3$, кривая 4- $K_c = -0.5 \cdot 10^3 \text{ Эрг/см}^3$, $K_1 = 2 \cdot 10^4 \text{ Эрг/см}^3$, $K_2 = -7 \cdot 10^4 \text{ Эрг/см}^3$.

В **четвертой главе** исследован неоднородный магнитоэлектрический эффект в редкоземельных (РЗ) ферритах – гранатах в рамках концепции полярного механизма МЭЭ. Изучена электрическая поляризация ФГ пленок, связанная с электро-дипольными моментами РЗ ионов, индуцированная неоднородным магнитным полем, обусловленным обменным взаимодействием РЗ подсистемы и подсистемы ионов железа Fe .

Как было показано в [13] обменное взаимодействие между подсистемами РЗ ионов и ионов Fe^{3+} приводит к возникновению электродипольных моментов РЗ ионов, характер упорядочения которых зависит от эффективного магнитного поля, создаваемого подсистемой ионов Fe^{3+} . А именно, в однородном эффективном магнитном поле формируется антисегнетоэлектрическая структура дипольных моментов, приводящая к нулевой электрической поляризации, в неоднородном магнитном поле, антисегнетоэлектрическая структура разрушается и появляется результирующая электрическая поляризация. В рамках данного механизма МЭЭ в работе исследована электрическая поляризация, обусловленная неоднородным магнитным полем 180° доменных границ в пленках РЗ ферритов – гранатов. Исследованы особенности поляризации, обусловленные изменением магнитной анизотропии пленок и соответственно, характером разворота спинов в ДГ. Показано, что электрическая поляризация отлична от нуля в окрестности 180° блоховских ДГ. Рассчитаны распределения электрической поляризации в ФГ пленке в окрестности ДГ Блоха. На рис.5 показаны профили электрической поляризации в окрестности 180° блоховской ДГ для $E \parallel$ ФГ. В этом случае существует только одна компонента поляризации $P_{[\bar{1}10]}$ перпендикулярная плоскости вращения намагничивания ($\bar{1}10$).

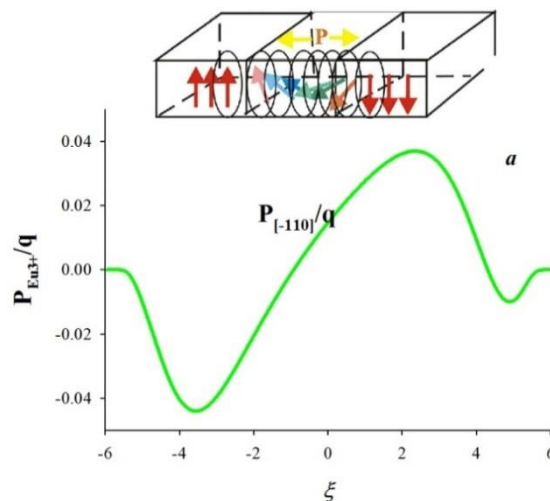


Рис.5. Распределение электрической поляризации 180° блоховской доменной стенки ($\xi = y / l$) для РЗ Eu .

Руководствуясь концепцией неоднородного магнитоэлектрического эффекта [8], можно ожидать наибольшую электрическую поляризацию в центре ДС, где магнитная неоднородность наиболее выражена. Однако в случае пленок Eu и Ho в этой области электрическая поляризация 180° блоховской ДС уменьшается. Это говорит о том, что в понятие неоднородного магнитоэлектрического эффекта должно быть привнесено дополнительный анализ с целью захвата специфических свойств конкретной мультиферроидной структуры. Магнитоэлектрический эффект в феррит – гранатах (ФГ) связан с поляризуемостью редкоземельных ионов в додекаэдрических © позициях и 3-хвалентных ионов железа в тетраэдрических (d) позициях. В результате действия неоднородного магнитного поля в кристаллах и пленках феррит – гранатов возникает нескомпенсированный дипольный момент. Вклады f – и d – ионов в результирующую поляризацию различны.

Проведено сравнение магнитоэлектрических вкладов поляризацию ФГ пленки, обусловленных РЗ (f -) ионами (рис.7) и (d-) ионами Fe^{3+} (рис.6).

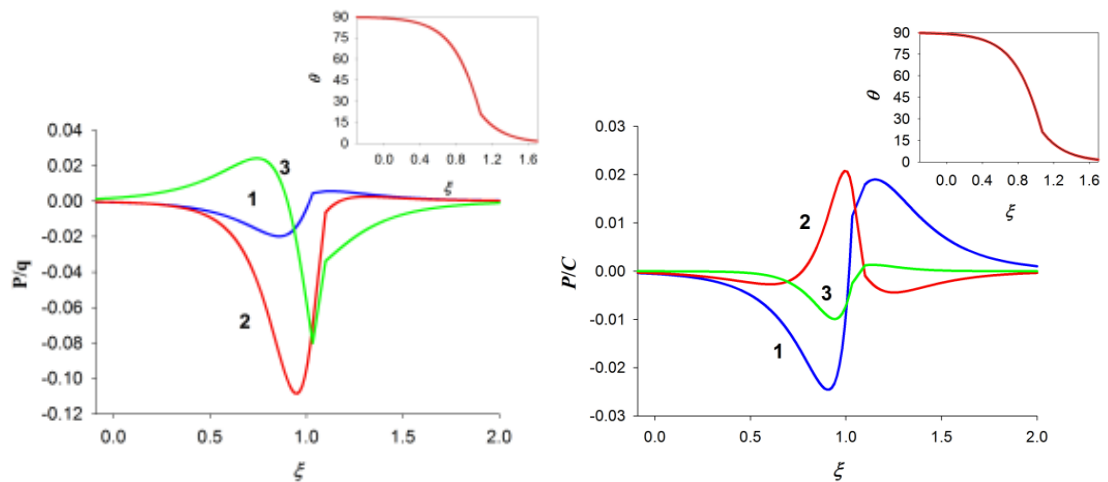


Рис. 6. Изменение поляризации $P(\xi)$ Eu ФГ, связанные а) с электрическими дипольными моментами редкоземельных ионов (Eu^{3+}), б) с ионами железа Fe^{3+} кривые 1, 2, 3 обозначают компоненты P_x , P_y , P_z .

В пятой главе представлены результаты теоретических исследований проявления флексомагнитоэлектрического эффекта в одноосной ферромагнитной пленке [5, 8, 10].

Численный анализ уравнений Эйлера-Лагранжа осуществлялся методом множественной стрельбы с применением итерационной процедуры по Ньютону [14], апробированный в [15]. Показано, что при действии электрического поля на образец, происходит изменение топологии 180° ДГ. Доменная граница блоховского типа ($\varphi = 0$) преобразуется в ДГ с некруговой траекторией вектора намагниченности ($\varphi = \varphi(y)$) (рис.7 а). Наблюдается выход вектора намагниченности $\mathbf{m}$ из плоскости вращения магнитных моментов (рис.7б).

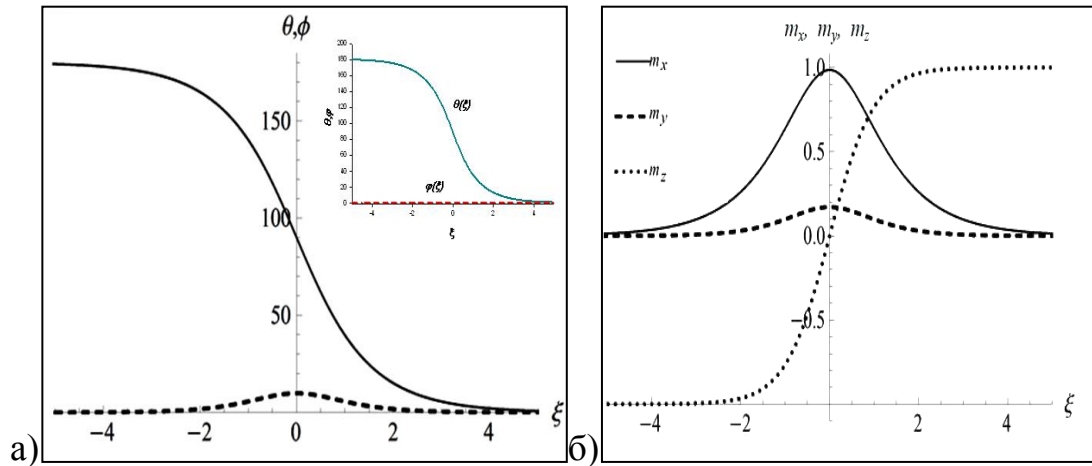


Рис. 7. Графики, иллюстрирующие распределение намагниченности $\mathbf{m}$ в 180° ДГ, представленные через зависимости её угловых переменных θ , φ (а) и через её компоненты m_x , m_y , m_z (б) от ξ .

Из этого следует, что ДГ благодаря ФМЭ механизму становится заряженной. При этом величина дифференциальной поляризации ДГ p , определяемая по формуле $p = -\frac{\partial \varepsilon_{\text{нмэв}}}{\partial \varepsilon}$ будет уже отличной от нуля (в данном случае $p > 0$) и стенка будет притягиваться к источнику поля.

При дальнейшем возрастании неоднородного электрического поля максимальный угол выхода $\varphi_m = \varphi(0)$ увеличивается и при определенном значении поля, становится равным $\pi/2$, т.е. в ней появляется неелевский

участок закона поворота $\mathbf{m}$ в переходном слое. Последний затем расширяется и при достижении полем величины $\varepsilon_{0c} = 0.488\varepsilon_1 180^\circ$ ДГ полностью становится неелевской ($m_x=0$).

До сих пор предполагалось, что вклад обеих параметров b_1 и b_2 , которые определяют интенсивности соответствующих частей неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия (НМЭВ), одинаков. В тоже время, выражение для плотности энергии НМЭВ, представленное, в [17] виде (1), предполагает, что эти вклады возможно отличаются.

$$\varepsilon_{\text{НМЭВ}} = \mathcal{E}(b_1 \mathbf{m} \text{div} \mathbf{m} + b_2 \mathbf{m} \text{rot} \mathbf{m}) \quad (1)$$

Поэтому в рамках данной задачи было выяснено степень влияния каждой части НМЭВ на структуру и поляризацию ДГ.

Расчеты показали (рис. 8), что вклад, обусловленный наличием в $\varepsilon_{\text{НМЭВ}}$ слагаемого, содержащего $\text{rot} \mathbf{m}$ (второй тип), приводит к более существенным изменениям структуры, чем вклад, связанный с $\text{div} \mathbf{m}$ (первый тип). Так поляризация p , обусловленная парциальным вкладом НМЭВ второго типа, имеет распределение по координате y , показанная на рис. 8. В то же время распределение поляризации, обусловленное первым типом НМЭВ, описывается также четной ограниченной функцией, но с двумя пиками, симметрично расположенными относительно оси ординат и с $p(0)=0$. Таким образом, в первом случае при включении поля в ДГ может возникнуть двойной электрический слой. В случае же $b_1=b_2$ их совместное действие также приводит к гауссовскому распределению величины v с максимальным значением поляризации в центре стенки.

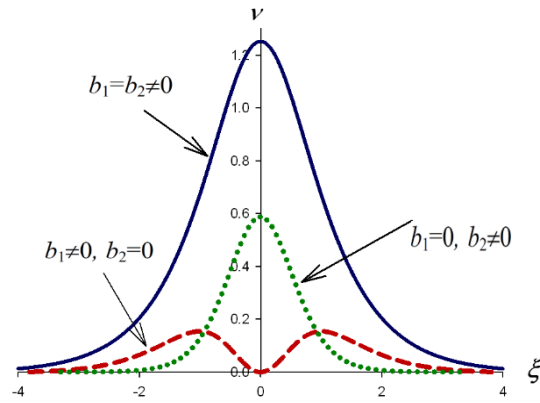


Рис.8. График зависимости параметра ν ($p = \nu p_0$, $p_0 = M_s^2 b_i / \Delta_0$) для 180° ДГ от ξ .

Также в данной главе рассмотрена ситуация возникновения 0° ДГ, которая является вполне закономерным явлением, т.к. действие такого рода поля на магнитные моменты ограничено в пространстве и проявляет себя как дефект, индуцированный электрическим полем. Магнитная неоднородность типа 0° ДГ в момент её образования уже является неблоховской, в которой зависимость $\varphi = \varphi(y)$ является нечетной функцией. Она, соответственно, имеет определенную поляризацию.

Выяснилось, что на 0° ДГ более сильное влияние оказывает часть НМЭВ первого типа, а на 180° ДГ – часть НМЭВ второго типа. Такая избирательность вкладов разного типа возможно объясняется тем, что НМЭВ второго типа, легче изменить структуру 180° ДГ, в которой уже имеется «завихрение» магнитных моментов (точнее замыкание магнитного потока в ДГ), чем структуру 0° ДГ, не обладающей такой особенностью.

В заключение приведены основные результаты и выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы неоднородные магнитоэлектрические эффекты, в пленках ферромагнетиков типа ферритов - гранатов, рассчитана электрическая поляризация, проявляющаяся в окрестности магнитных неоднородностей в области интерфейса пленок и магнитных доменных

границ, исследовано влияние магнитного и электрического поля на электрическую поляризацию и намагниченность пленок.

Основные результаты работы:

- 1) Рассчитана электрическая поляризация обменно – связанной ферромагнитной пленки со сложным характером магнитной анизотропии. Показано, что учет кубической анизотропии приводит к выделению определенного направления электрической поляризации. Рассмотрено воздействие магнитного поля на электрическую поляризацию и намагниченность пленки. Показано, что магнитное поле, приложенное вдоль оси трудного намагничивания, приводит к повороту вектора электрической поляризации $\mathbf{P}$ (от направления $[011]$ к направлению $[010]$ (ОН) для (001) – пленки), эффект наблюдается при учете кубической магнитной анизотропии.
- 2) Построены $P - H$ диаграммы, иллюстрирующие зависимости электрической поляризации (P) обменно – связанной пленки от величины и направления внешнего магнитного поля (H), рассмотрены две геометрии – поле в плоскости пленки и по нормали к поверхности пленки. Рассчитаны возможные магнитные конфигурации (блоховские, неелевские, смешанного типов), реализующиеся при намагничивании пленки, и возникающая в их окрестности электрическая поляризация. Определены основные различия полевых зависимостей электрической поляризации для случаев ферро – и антиферромагнитного упорядочения в окрестности границы раздела сред.
- 3) В рамках концепции полярного механизма магнитоэлектрического взаимодействия в ферритах гранатах, обусловленного взаимодействием редкоземельной ($R3$) подсистемы и подсистемы ионов железа, рассчитана электрическая поляризация неоднородно намагниченных эпитаксиальных пленок ферритов - гранатов. Проведено сравнение магнитоэлектрических вкладов, обусловленных $R3$ (f -) ионами и Fe^{3+} (d -) ионами. Показано, что электрическая поляризация может быть реализована в пленках ферритов гранатов в окрестности блоховских доменных границ. Рассчитаны графики

распределения поляризации в окрестности 180° блоховских и квазиблоховских доменных границ редкоземельных (РЗ) ферритов - гранатов.

4) Разработана модель взаимодействия магнитных доменных границ с неоднородным электрическим полем. Исследована трансформация 180° доменных границ (блоховская ДГ – квазиблоховская ДГ – неелевская ДГ), индуцированная действием локального электрического поля, направленного по нормали к поверхности пленки. Показано, что благодаря ФМЭ механизму ДГ становится электрически заряженной (возникает электрическая поляризация). Увеличении величины электрического поля приводит к возрастанию интегральной поляризации P и максимального угла выхода намагниченности из плоскости ДГ.

5) Теоретически описаны процессы зарождения магнитной неоднородности типа 0° ДГ, с неблоховским характером разворота вектора намагниченности. Рассчитаны и проанализированы изменения электрической поляризации, возникающей благодаря флексомагнитоэлектрическому (ФМЭ) механизму в окрестности 180° и 0° ДГ. Исследовано влияние парциальных вкладов ФМЭ, обусловленных наличием в них $div\mathbf{m}$ и $rot\mathbf{m}$ в рассматриваемые явления. Показано, что на 180° ДГ более сильное влияние оказывает часть НМЭВ, содержащей $rot\mathbf{m}$, а на 0° ДГ – часть НМЭВ, содержащей $div\mathbf{m}$.

Список литературы

1. Spaldin, N. A. Advances in magnetoelectric multiferroics / N. A. Spaldin and R. Ramesh // Nat. Mater. – 2019. – V. 18. – Is. 3. – P. 203-212.
2. Jia, T. Domain switching in single-phase multiferroics / T. Jia, Z. Cheng, H. Zhao, H. Kimura // Appl. Phys. Rev. – 2018. – V. 5. – P. 021102 (24).
3. Звездин, А.К. Мультиферроики: перспективные материалы микроэлектроники, спинтроники и сенсорной техники / А.К. Звездин, А.С.

Логгинов, Г.А. Мешков, А.П. Пятаков // Известия РАН, Серия физическая. - 2007. - Т. 71.-№ 11.-С. 1604-1605.

3. O'Dell, T.H. An induced magneto-electric effect in yttrium iron garnet / T.H. O'Dell // Philos. Mag. – 1967. – V. 16, iss. 141. – P. 487-494.

4. Cardwell, M.J. The Second Order Magnetoelectric effect in yttrium iron garnet/ M.J. Cardwell // Phys. state sol. (b). – 1971. – V. 45. – P. 597-601.

5. Кричевцов, Б.Б. Гигантский линейный магнитоэлектрический эффект в пленках ферритов-гранатов / Б.Б. Кричевцов, В.В. Павлов, Р.В. Писарев // Письма в ЖЭТФ. – 1989. – Т. 49, – № 8. – С. 466-469.

6. Бухараев, А.А. Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах / А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов //УФН. – 2018. – Т. 188. – С. 1288-1330.

7. Еремина, Р.М. Осцилляции в спектре ЭПР интерфейсов мультиферроик/ферроэлектрик $GdMnO_3/SrTiO_3$ и $YbMnO_3/SrTiO_3$ / Р.М. Еремина, Т.П. Гаврилова, И.И. Фазлижанов, И.В. Яцык, Д.В. Мамедов, А.А. Суханов, В.И. Чичков, Н.В. Андреев, Х.-А. Круг фон Нидда, А. Лойдл // Физика низких температур. – 2015. – Т. 41. – С. 57-61.

8. Логгинов, А.С. Магнитоэлектрическое управление доменными границами в пленке феррита граната / А.С. Логгинов, Г.А. Мешков, А.В. Николаев, А.П. Пятаков // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 86, № 2. – С. 124 - 127.

9. Барьяхтар, В.Г. Теория неоднородного магнитоэлектрического эффекта / В.Г. Барьяхтар, В.А. Львов, Д.А. Яблонский // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1983. – Т.37, № 12. – С. 565 - 567.

10. Пятаков, А.П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А.П. Пятаков, А.К. Звездин // УФН. – 2012. – Т. 182, №6. – С. 593-620.

11. Вахитов, Р.М. Влияние электрического поля на структуру доменных границ в магнетиках с флексомагнитоэлектрическим эффектом /

Р.М. Вахитов, А.Т. Харисов, Ю.Е. Николаев // ДАН. Физика. – 2014. Т. 455. – С. 150-152.

12. Gareeva, Z.V. Peculiarities of electric polarization in bi-layered longitudinally magnetized ferromagnetic film / Z.V. Gareeva, R.A. Doroshenko, N.V. Shulga, K. Harbusch // J. Magn. Magn. Mater. – 2009. – V. 321, iss. 9. – P. 1163-1166.

13. Popov, A. I. Magnetoelectricity of domain walls of rare-earth iron garnets / A. I. Popov, Z. V. Gareeva, A. K. Zvezdin // Phys. Rev. B. – 2015. – V. 92. – P. 144420 (10).

14. Холл, Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Дж. Холл, Дж. Уатт. – М: Мир, 1979. – 372 с.

15. Вахитов, Р.М. Особенности структуры микромагнитных образований на дефектах пленок ферритов-гранатов / Р.М. Вахитов, Т.Б. Шапаева, Р.В. Солонецкий, А.Р. Юмагузин // ФММ. – 2017. – Т. 118. – С. 571-575.

16. Hubert A., Schäfer R. Magnetic domains / Hubert A., Schäfer R. – Berlin: Springer-Verlag, 2009 – 696 p.

17. Dzyaloshiskii, I.E. Magnetoelectricity in ferromagnets / I.E. Dzyaloshiskii // Europhys. Lett. – 2008. – V. 83. – P. 67001 (2).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Публикации в рецензируемых журналах

A1. Gareeva, Z.V. Electric polarization in bi-layered ferromagnetic film with combined magnetic anisotropy / Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko, N.V. Shulga // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – V. 385. – P. 60-64.

A2. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация (100)-ориентированной двухслойной ферромагнитной пленки/ Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Вестник Башкирского университета. – 2015. – Т. 20, №3. – С. 832-83.

A3. Gareeva, Z.V. Ferroelectric polarization in antiferromagnetically coupled ferromagnetic film / Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – V. 414. – P. 74-77.

A4. Popov, A.I. Ferroelectricity of domain walls in rare earth iron garnet films / A.I. Popov, K. A. Zvezdin, Z. V. Gareeva, F. A. Mazhitova, R. M. Vakhitov, A. R. Yumaguzin, A. K. Zvezdin // J. Phys.: Condens. Matter. – 2016. – V. 28. – P. 456004.

A5. Popov, A.I. Magnetoelectric properties of epitaxial ferrite garnet film/ A.I. Popov, Z. V. Gareeva, F. A. Mazhitova, R.A. Doroshenko // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V. 461. – P. 128-131.

A6. Вахитов, Р.М. Микромагнитные структуры, индуцированные неоднородным электрическим полем, в магнитоодноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом / Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Р.В. Солонецкий, Ф.А. Мажитова // Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61, №6. – С. 1120.

Публикации в сборниках трудов конференций

A7. Мажитова, Ф.А. Процессы намагничивания и электрическая поляризация в двухслойной обменно-связанной магнитной пленке / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева, Н.В. Шульга // Тезисы докладов второй Всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2014. – С.55.

A8. Мажитова, Ф.А. Магнитоэлектрический эффект в двухслойной ферромагнитной пленке / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // ВНКСФ-21. Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых / Екатеринбург – Омск: изд. АСФ России. – 2015 г. – С.266-267.

A9. Мажитова, Ф.А. Magnetoelectric effect in bi-layered ferromagnetic film (Магнитоэлектрический эффект в двухслойной ферромагнитной пленке) / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Материалы пятой Всероссийской научно-

практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Иностранный язык в профессиональной коммуникации» / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2015 г. – С.261.

A10. Мажитова, Ф.А. Процессы намагничивания и электрическая поляризация в двухслойной обменно- связанной магнитной пленке / Ф.А. Мажитова // Материалы XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» /[Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс –2015 г.

A11. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация в двухслойной пленке с ферромагнитным взаимодействием спинов / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Тезисы докладов второй межрегиональной школы-конференции «Теоретические и экспериментальные исследования в конденсированных средах» / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2015 г.– С.34.

A12. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация в двухслойной пленке / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Тезисы докладов VIII Международной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложение в естествознании» / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2015 г.– С.10.

A13. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация двухслойной ферромагнитной пленки с АФМ упорядочением спинов на границе раздела сред / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Тезисы докладов III Всероссийской научной молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2015 г.– С.177.

A14. Gareeva, Z.V. Magnetoelectric properties of bi-layered magnetic film / Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko, T.T. Gareev //Abstracts EASTMAG -2016, VI Euro - Asian Symposium "Trends in MAGnetism", Krasnoyarsk. –2016, p.478.

A15. Мажитова, Ф.А. Неоднородный магнитоэлектрический эффект в двухслойной пленке с параметрами ферритов-гранатов / Ф.А. Мажитова, З.В.

Гареева // Тезисы докладов научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков, посвящённой 100-летию со дня рождения первого ректора БашГУ Ш.Х. Чанбарисова / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2016 г. – С.6.

A16. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация в двухслойной пленке с параметрами ферритов-гранатов / Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Сборник трудов открытой школы-конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы», Уфа. –2016 г.-С.91 .

A17. Вахитов, Р.М. Влияние неоднородного электрического поля на условия образования и структуру магнитных неоднородностей в магнитоодноосных пленках. / Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Ф.А. Мажитова, Р.В. Солонецкий // Сборник трудов XII Международного семинара «Магнитные фазовые переходы», г. Махачкала. – 2017 г.-С. 60.

A18. Gareeva, Z.V. Mechanism of magnetoelectric effects in iron garnet film / Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko, A.I. Popov, A.K. Zvezdin // Сборник трудов XII международного семинара «Магнитные фазовые переходы», г. Махачкала.– 2017 г. – С.77.

A19. Gareeva, Z.V. Magnetoelectric effects in ferrite garnet films / Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova, R.A. Doroshenko, A.I. Popov // Book of abstracts, Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow. – 2017, p. 905.

A20. Vakhitov, R.M. Influence of non-uniform electric field on the structure and properties of magnetic inhomogeneities in uniaxial multiferroic films / R.M. Vakhitov, R.V. Solonetskiy, Z.V. Gareeva, F.A. Mazhitova // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017), Moscow. – 2017- p. 910.

A21. Вахитов Р.М., Гареева З.В., Солонецкий Р.В., Мажитова Ф.А. Зарождение и трансформация микромагнитных структур в неоднородном электрическом поле в одноосных мультиферроиках // Сборник трудов XXIII

Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах-XXIII», Москва. – 2018 г.– С. 790.

A22. Попов А.И., Гареева З.В., Мажитова Ф.А., Дорошенко Р.А. Механизмы магнитоэлектрических эффектов в ферритах гранатах // Сборник трудов XXIII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах-XXIII», Москва. – 2018 г.– С. 750.

A23. Вахитов, Р.М. Микромагнитные структуры, образующиеся в неоднородном электрическом поле в магнитоодноосных пленках / Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Р.В. Солонецкий, Ф.А. Мажитова // Сборник тезисов докладов V Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», Уфа. – 2018 г.– С.26.

A24. Вахитов, Р.М. Возникновение микромагнитных структур в неоднородном электрическом поле в одноосных мультиферроиках // Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Р.В. Солонецкий, Ф.А. Мажитова / Тезисы докладов X Международной школы-конференции «Фундаментальная математика и ее приложение в естествознании», Уфа. – 2018 г.– С.23.

A25. Вахитов, Р.М. Магнитоэлектрический эффект в пленках феррит – гранатов с неоднородным распределением намагниченности / Р.М. Вахитов, З.В. Гареева, Р.В. Солонецкий, Ф.А. Мажитова // Сборник тезисов и докладов Всероссийской конференции-школы с международным участием «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах, Уфа.– 2019 г.– С.46.

A26. Vakhitov, R.M. Some aspects of the flexomagnetolectric interaction in a uniaxial ferromagnet in a planar magnetic field / R.M. Vakhitov, R.V. Solonetsky, F.A. Maksutova, A.P. Pyatakov // Abstracts EASTMAG -2019, VII Euro - Asian Symposium "Trends in MAGnetism", Ekaterinburg. –2019, p.37.