

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.080.03,

созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ФГБУН ИПСМ РАН), по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26 декабря 2019 г., протокол № 12/19

О присуждении Максutowой Филюзе Абдрахимовне, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Магнитоэлектрический эффект в окрестности магнитных неоднородностей в пленках типа ферритов-гранатов» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 25 ноября 2019 г., протокол № 7/19, диссертационным советом Д 002.080.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, адрес: 450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, Приказ Министерства образования и науки РФ о создании совета - № 785/нк от 10.07.2015 г.

Соискатель Максutowа Филюза Абдрахимовна (девичья фамилия Мажитова), 1992 года рождения. В 2016 году соискатель окончила магистратуру физико-технического института Башкирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 – Физика. В настоящее время Максutowа Ф.А. является аспирантом четвертого года обучения на кафедре теоретической физики физико-технического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, специальность 01.04.02 – Теоретическая физика.

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

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент, **Гареева Зухра Владимировна**, Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория теоретической физики, заведующая лабораторией, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. **Ерёмина Рушана Михайловна**, доктор физико-математических наук, доцент, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник;

2. **Загребин Михаил Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет», доцент кафедры радиофизики и электроники

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, г. Махачкала, в своем положительном заключении, подписанном, **Хизриевым Камалом Шахбановичом** кандидатом физико-математических наук, врио директора Института физики им. Х.И. Амирханова – обособленного подразделения ФГБУН Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, указала, что «...Диссертационное исследование, выполненное Максutowой Ф.А., проведено с использованием современных и хорошо апробированных методов исследования. Результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, являются

достоверными и обоснованными. Они согласованы с экспериментальными результатами и проведенными ранее численными расчетами...

По актуальности поставленных задач, по важности и степени обоснованности научных положений, достоверности и новизне результатов, диссертационная работа Максutowой Филюзы Абдрахимовны удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 26 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 26 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6. Шесть публикаций по теме диссертации являются научными статьями, написанными при его непосредственном участии, их общий объём – 32 печатных листа. В данных работах исследован магнитоэлектрический эффект в пленках ферритов - гранатов с неоднородным распределением намагниченности, рассчитана электрическая поляризация, проявляющаяся в окрестности магнитных неоднородностей в области интерфейса пленок, а также в окрестности магнитных доменных границ, исследовано влияние магнитного и электрического поля на электрическую поляризацию и намагниченность пленок. 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. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, вида, авторского вклада и объема научных изданий.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации:

1. 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.

2. Мажитова, Ф.А. Электрическая поляризация (100)-ориентированной двухслойной ферромагнитной пленки/ Ф.А. Мажитова, З.В. Гареева // Вестник Башкирского университета. – 2015 . – Т. 20, №3. – С. 832-835.

3. 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.

4. 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(7).

5. Popov, A.I. Magnetolectric 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.

6. 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. 1120-1127.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Профессора кафедры общей физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», д.ф.-м.н., профессора **Попова А. И.** Отзыв положительный, без замечаний.

2. Профессора кафедры Промышленных технологий ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», д.ф.-м.н., профессора **Филлипова Д.А.** Отзыв положительный, без замечаний.

3. Заведующего кафедрой экспериментальной физики и инновационных технологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет, к.ф.-м.н., доцента **Орлова В.А.** Отзыв положительный, имеются 3 замечания: 1) в тексте автореферата автор не приводит исходных уравнений для своих расчетов, ограничиваясь кратким словесным описанием своих действий. По этой причине при чтении приходится 1-2 раза обращаться к полному тексту диссертации. Впрочем, и без этого, автореферат богато иллюстрирован, что очень способствует пониманию сути работы; 2) на мой взгляд, в тексте автореферата автор использует жаргонное построение, например «...учет ...кубической анизотропии...выделяет направление электрической

поляризации» на стр. 5, 7, 20; 3) в автореферате практически нет сравнительного анализа с данными экспериментов, хотя полный текст диссертации лишен этого недостатка и перечень упомянутых экспериментальных работ обширен.

4. Профессора кафедры физики колебаний ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», д.ф.-м.н. **Пятакова А.П.** Отзыв положительный, без замечаний.

5. Старшего научного сотрудника лаборатории физики магнитных гетероструктур и спинтроники ФГАОУ «Московский физико-технический институт», к.ф.-м.н. **Костюченко Н. В.** Отзыв положительный, без замечаний.

6. Ведущего научного сотрудника лаборатории квантовых кристаллов ФГБУН Института физики твердого тела РАН, д.ф.-м.н. **Успенской Л.С.** Отзыв положительный, имеются 3 замечания: 1) к сожалению, при оформлении автореферата диссертантом была допущена небрежность: в разделе апробация результатов в пунктах 9 и 10 приведены неполные данные о конференциях; 2) в разделе Актуальность работы при описании достижений прошлых лет при упоминании работ 60-х годов дана ссылка на публикацию 2019 г., далее идет ссылка на 2018 и при тексте: "в последующие годы.." идет ссылка на публикацию 2007 года; 2) на стр. 3, 9 имеются опечатки.

7. Старшего научного сотрудника кафедры магнетизма физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», к.ф.-м.н. **Шапаевой Т.Б.** Отзыв положительный, имеются 2 замечания: 1) слишком мелкие подписи на графиках-вставках на рис. 6 и 7, это затрудняет восприятие результатов, полученных автором; 2) кроме того при формулировке цели работы, было отмечено, что результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, однако в автореферате такого сопоставления нет.

8. Заведующего лабораторией магнитной доменной структуры НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», старшего научного сотрудника, к.ф. м.н. **Памятных Л.А.** Отзыв положительный, имеются 4 замечания: 1) В автореферате диссертации не приводится формальная постановка задачи для

каждой оригинальной главы (геометрия задачи, учитываемые энергии, исследованный диапазон параметров системы). Следует отметить, что описание используемых методов решения приведено в тексте автореферата только для одной оригинальной (пятой) главы; 2) В тексте автореферата присутствуют опечатки и ошибки оформления. На титульном листе вместо «Автореферат диссертации на соискание...» написано «Автореферат на соискание...». Подпись к рисунку 5 находится на следующей после рисунка странице; 3) В тексте автореферата не дано определение некоторых величин (например, параметра ν , см. рис.8); 4) В разделе «Апробация результатов» в пункте 9 отсутствуют данные о годе и месте проведения конференции, в п.10 не указан год проведения конференции.

В отзывах указано, что представленная работа имеет большое практическое значение и по своей новизне и актуальности соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. Имеющиеся замечания касаются технических недочетов, допущенных при оформлении диссертации и автореферата, а также содержат рекомендации по сравнению полученных результатов с экспериментальными данными.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они являются компетентными специалистами в данной отрасли науки, широко известны своими достижениями в данной области и способны определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

— *разработаны* теоретические методы исследования электрических свойств двухслойных обменно–связанных ферромагнитных пленок с ферро – и антиферромагнитным упорядочением спинов на границе раздела сред в рамках концепции неоднородного магнитоэлектрического эффекта; *расчета* электрической поляризации в магнитно–неоднородных пленках редкоземельных ферритов - гранатов в рамках концепции полярного механизма магнитоэлектрического взаимодействия; разработана модель для описания взаимодействия магнитных

доменных границ с неоднородным электрическим полем (флексомагнитоэлектрический эффект);

— предложены теоретические модели для расчета электрической поляризации доменных границ в пленках ферритов-гранатов, использующие квантовомеханический подход и методы микромагнитного моделирования;

— показано возникновение электрической поляризации в обменно-связанной ферромагнитной пленке со сложным характером магнитной анизотропии, продемонстрировано, что электрическая поляризация может быть реализована в пленках ферритов-гранатов в окрестности блоховских доменных границ; показано, что неоднородное электрическое поле влияет на топологию и свойства микромагнитных структур, имеющих место в одноосных ферромагнитных пленках при наличии в них флексомагнитоэлектрического эффекта;

— по результатам работы выявлено, что в понятие неоднородного магнитоэлектрического эффекта должен быть привнесен дополнительный анализ с целью учета специфических свойств конкретной мультиферроидной структуры.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

— показана возможность возникновения микромагнитных структур блоховского, неелевского и смешанного типа, реализующихся в двухслойной пленке при определенных сочетаниях внешних и внутренних параметров, а также возникновение сопутствующей электрической поляризации; показано, что проявление магнитоэлектрического эффекта в неоднородно – намагниченных пленках ферритов - гранатов связано с электро-дипольными моментами редкоземельных ионов и ионов железа; в магнитоодноосных ферромагнитных пленках благодаря флексомагнитоэлектрическому взаимодействию происходит трансформация распределения намагниченности в 180-градусной доменной границе, а именно переход из блоховской структуры в квазиблоховскую с отклонением вектора намагниченности \mathbf{m} от плоскости стенки при приложении неоднородного электрического поля;

— применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих методов исследования, в том числе численных методов:

электрическая поляризация двухслойных ферромагнитных пленок рассчитана с помощью оригинального пакета программ, составленного на основе использования методов многомерной оптимизации функционалов;

для расчета магнитоэлектрических свойств ферритов-гранатов предложен комплексный теоретический подход, основанный на использовании квантовомеханических методов и микромагнитного моделирования, проводимого на основе минимизации функционала плотности свободной энергии (данный подход является оригинальным, позволяющим получать унифицированное описание магнитоэлектрических свойств любых редкоземельных мультиферроидных материалов);

численное исследование уравнений Эйлера – Лагранжа для случая неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия (флексомагнитоэлектрический механизм) основано на использовании метода множественной стрельбы с применением итерационной процедуры по Ньютону;

– *изложены* положения и идеи, которые вносят вклад в понимание особенностей возникновения магнитоэлектрического эффекта в области магнитных неоднородностей в ферромагнитных пленках;

– *раскрыты* существенные проявления теории:

полученные в работе результаты, показывают необходимость учета нескольких связанных механизмов при анализе магнитоэлектрических эффектов ферритов – гранатов;

– *показано*, что для корректного описания магнитоэлектрических эффектов необходимо рассматривать ряд механизмов магнитоэлектрических взаимодействий, отражающих специфику конкретной структуры мультиферроика.

– *проведена модификация* численных методов, обеспечивающих получение новых результатов по теме диссертации: на основе учета изменения всех параметров порядка мультиферроика – структурных, сегнетоэлектрических, магнитных в широком диапазоне изменения внешних параметров (магнитного и электрического полей).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– *предложены* теоретические модели, на основе которых получены оригинальные результаты, которые могут быть использованы для объяснения новых экспериментальных эффектов и объяснения механизмов магнитоэлектрических взаимодействий, а также для разработки элементов информационных технологий, магнитной памяти нового поколения;

– *определены* перспективы применения полученных результатов на практике: доменные стенки являются активными элементами устройств наноэлектроники, спинтроники и др. устройств;

расчеты, проведенные в рамках данной работы, позволят определить основные характеристики и параметры магнитоэлектрических доменных границ, оценить условия их реализации и эффективность управления; а также обозначить принципиально новые эффекты, обусловленные взаимодействием нескольких параметров порядка;

выбор оптимальной геометрии электрического и магнитного поля для увеличения магнитоэлектрического эффекта в гетероструктурах позволит определить механизмы эффективного магнитоэлектрического контроля магнитного состояния мультиферроидных систем;

– *представлены* рекомендации практического применения: пленки мультиферроидных материалов могут служить рабочими элементами в спинтронных устройствах, используемых в магниторезистивных элементах магнитной памяти произвольного доступа MRAM, от которой, несмотря на жесткую конкуренцию на рынке запоминающих устройств ожидают широких перспектив внедрения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– *теория* хорошо согласуется с известными ранее теоретическими и экспериментальными результатами, полученными при исследовании неоднородного магнитоэлектрического эффекта в пленках ферритов-гранатов;

– *идея* базируется на анализе результатов работ в области магнитоэлектрического управления микромагнитными структурами в ферромагнитных пленках;

– *использованы* апробированные методы теории микромагнетизма и численных методов, подтверждается обоснованность сделанных допущений, совпадение предельных переходов полученных ранее результатов по рассматриваемой тематике;

– *установлено* качественное согласие с экспериментальными данными: в работах, где приводятся экспериментальные наблюдения процессов зарождения и трансформации магнитных неоднородностей в неоднородном электрическом поле, имеется в основном качественная картина изучаемого явления; количественные оценки характерных полей невозможно осуществить, в том числе потому, что в этих работах изучались пленки, в которых существенное влияние на структуру и свойства магнитных неоднородностей оказывают ромбическая и «скошенная» ромбическая анизотропии. В данной работе анализ магнитных неоднородностей рассмотрен в одноосном ферромагнетике. Однако общая картина поведения микромагнитных структур в неоднородном электрическом поле, полученная здесь, в основном, не противоречит экспериментальным данным.

Личный вклад соискателя состоит в:

проведении численных расчетов неоднородных магнитных структур и сопутствующей электрической поляризации в двухслойной ферромагнитной пленке, пленках ферритов-гранатов и одноосных ферромагнетиках с флексомагнитоэлектрическим эффектом, проведении анализа полученных результатов; при непосредственном участии автора проводилось обсуждение результатов исследований, подготовка публикаций по теме диссертации.

На заседании 26 декабря 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Максutowой Ф.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве «22» человек, из них «10» докторов наук по специальности 01.04.07 – «Физика

конденсированного состояния», «8» докторов наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», участвовавших в заседании, из «22» человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – «18», против присуждения ученой степени – «0», недействительных бюллетеней – «0».

Председатель диссертационного совета,

д. ф.-м. н., профессор



Мулюков Радик Рафикович

Ученый секретарь диссертационного совета,

д. ф.-м. н.

Имаев Марсель Фанирович

26 декабря 2019 г.