

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Максутовой Филозы Абдрахимовны  
«**Магнитоэлектрический эффект в окрестности магнитных  
неоднородностей в пленках типа ферритов-гранатов**»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертация Максутовой Филозы Абдрахимовны посвящена анализу механизмов магнитоэлектрических эффектов в мультиферроидных материалах редкоземельных ферритах–гранатах. С момента открытия материалов, в которых наблюдаются и электрическая поляризация и ферромагнетизм, интерес к этим объектам непрерывно возрастает. Природе механизмов взаимодействия между электрическими и магнитными подсистемами уделяется значительное внимание в литературе. Данная проблема представляется важной не только как фундаментальная задача физики конденсированного состояния, но и как проблема, решение которой открывает широкие перспективы применения материалов с магнитоэлектрическим взаимодействием в электронных устройствах нового поколения.

В связи с этим проведенные Максутовой Филозой Абдрахимовной теоретические исследования механизмов взаимодействия и расчет поляризационной картины на границе слоев в ферритах - гранатах  $R_3Fe_5O_{12}$  являются актуальным как в теоретическом, так и прикладном аспектах.

### Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой и авторской литературы. Общий объем работы составляет 101 страница, включая 40 рисунков, 3 таблицы и библиографию из 106 наименований.

В **первой** главе приведен короткий обзор класса материалов, проявляющих магнитоэлектрические свойства, даны характеристики групп и типов мультиферроиков, проведена классификация магнитоэлектрических эффектов. Описан процесс возникновения электрической поляризации вблизи магнитной неоднородности, в качестве

Входящий ИБСМ  
№ 661  
от 09.12.2019

которых могут выступать доменные границы, интерфейсы тонких пленок и т.д. Подробно рассмотрена кристаллографическая структура ферритов - гранатов  $R_3Fe_5O_{12}$  и, показано, что квадратичный магнитоэлектрический эффект наблюдается в кристаллах, тогда как в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов регистрируется линейный магнитоэлектрический эффект.

Во **второй** главе описаны особенности неоднородного магнитоэлектрического эффекта, рассчитана электрическая поляризация, возникающая на магнитной неоднородности двухслойной ферромагнитной гетероструктуры. Проведенные автором расчеты позволили установить, что если магнитное поле приложено в направлении нормали к поверхности пленки, то электрическая поляризация проходит через максимум, а при дальнейшем повышении магнитного поля, спадает. *Впервые* теоретически обоснован разворот вектора электрической поляризации под действием внешнего магнитного поля в двухслойной пленке с комбинированной магнитной анизотропией.

**Третья** глава включает теоретическое рассмотрение магнитоэлектрических свойств двухслойных систем с магнитной неоднородностью в двухслойной ферромагнитной пленке с антиферромагнитным упорядочением спинов в окрестности границы раздела. *Впервые* автором рассчитано, что в зависимости поляризации от величины приложенного магнитного поля в интервале  $15\text{кЭ} < H < 42\text{кЭ}$  вдоль оси [011], наблюдается резкий спад с последующим увеличением поляризации при определенных соотношениях между энергиями анизотропии. *Впервые* установлена пространственная ориентация магнитных моментов на границе раздела сред, показано, что резкие изменения магнитной структуры может быть индуцировано магнитным полем. В зависимости от величины приложенного внешнего магнитного поля реализуются магнитные конфигурации неелевского, блоховского или смешанного неель – блоховского типа.

В **четвертой** главе приведены результаты оригинального исследования влияния локальной симметрии редкоземельных ионов в феррит-гранатах на магнитоэлектрическую активность, рассчитана электрическая поляризация в месте блоховских и квазиблоховских доменных границ, которые являются источниками эффективного неоднородного магнитного поля, в эпитаксиальных пленках редкоземельных ферритов-гранатов. *Впервые* показано, что магнитоэлектрический эффект в феррит - гранатах связан с поляризуемостью редкоземельных ионов в додекаэдрических (с) позициях и 3-х валентных ионов железа в тетраэдрических (d) позициях. Возникновение нескомпенсированного дипольного момента автор связывает с наличием двух магнитно неэквивалентных позиций.

В **пятой** главе рассмотрены магнитные и электрические особенности поведения доменных границ при действии электрического поля на поверхность пленки. Автором *впервые* проведено численное решение уравнений методом множественной стрельбы с применением итерационной процедуры по Ньютону, что позволило установить действие электрического поля на образец, когда доменная граница блоховского типа преобразуется в границу с некруговой траекторией вектора намагниченности, что приводит к появлению поляризации. Филюза Абдрахимовна провела тщательный анализ поведения доменной стенки в электрическом поле, убедительно показала, что характер поляризации меняется при значении поля вблизи критического так, что доменная граница трансформируется от квазиблоховского типа к неелевскому. *Впервые* рассмотрен механизм движения доменной стенки под действием внешнего электрического поля, когда электрическое поле, направленное вверх, индуцирует связанные заряды положительного знака, в результате доменная граница притягивается к источнику поля.

На защиту вынесено шесть научных положений. Все выводы диссертации хорошо обоснованы и не вызывают возражений.

#### **Научная новизна и достоверность защищаемых положений**

Достоверность полученных данных подтверждается применением апробированных численных методов, согласием с экспериментальными результатами других авторов и непротиворечивостью известным физическим моделям.

*Впервые* теоретически рассчитан поворот вектора электрической поляризации, индуцированный магнитным полем, в двух ферромагнитных слоях с разной анизотропией.

*Впервые* теоретически показано влияние величины и знака обменного взаимодействия между спинами из различных ферромагнитных слоев на характер магнитоэлектрического эффекта.

*Впервые* установлено, что минимум зависимости энергии доменной границы от смещения ее центра достигается, когда центр доменной границы стремится совместиться с центром внешнего электрического поля.

#### **Практическая значимость работы**

Автором была разработана уникальная новые программы расчета поведения доменной границы под действием внешнего электрического поля, что позволит интерпретировать эксперименты по действию неоднородного электрического поля, создаваемого заряженной иглой, расположенной около поверхности пленки.

Впервые на основе анализа предсказаны особенности флексомагнито-электрического эффекта в магнитоодноосных пленках при локальном воздействии

электрического поля на определенные участки поверхности необходимые для проведения направленного экспериментального изучения.

**К важнейшим результатам** диссертационной работы Ф.А. Максумовой можно отнести:

- Расчет диаграмм электрической поляризации- внешнее магнитное поле при различных типах взаимодействия между слоями и магнитной анизотропии слоев;
- Доказательство появления электрической поляризации в окрестности блоховских доменных границ.
- Разработанную модель взаимодействия магнитных доменных границ с неоднородным электрическим полем.

Каждый из этих результатов обладает несомненной **научной новизной и является практически значимым.**

**Вопросы и замечания:**

1. В диссертацию встречаются опечатки, так отсутствует рисунок 2.2. На рисунке 3.2 приведены три теоретически рассчитанные зависимости электрической поляризации от внешнего магнитного поля при трех различных наборах параметров. Авторы не указывает, какой цвет кривой соответствует какому набору параметров, также в подписи к рисунку 5.4 есть ссылка на рисунок 2, который отсутствует в диссертации.
2. В главах 2, 3 автор проводит расчет вектора электрической поляризации на основе минимизации термодинамического потенциала системы обменно связанных пленок с различной анизотропией в слоях, результаты приведены на рисунках 2.3-2.5. При этом в параграфе не указано, при каких значениях констант:  $K_1$  – наведенной анизотропии типа «легкая ось»,  $K_2$  – анизотропии типа «легкая плоскость»,  $K_c$  – кубической анизотропии ( $K_c < 0$ ) и  $J$  – константа межслойного обменного взаимодействия проведены расчеты. В параграфе 3.2 не приведено значение величины антиферромагнитного обменного взаимодействия, для которого проведены расчеты и показаны результаты на рисунках 3.2-3.3 и 3.6-3.7.
3. Некоторое неудовлетворение вызывает невозможность сравнить полученные теоретические результаты с экспериментом.

Сделанные выше замечания никак не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Высокий уровень диссертации подтверждается уровнем журналов, в которых опубликованы статьи диссертанта. Отмечаю, что в статьях автор диссертации выступает под фамилией Мажитова Ф. А., впоследствии она поменяла фамилию на Максумову Ф.А., подтверждением служит предоставленное свидетельство о браке №1201990200002000004009. Публикации в научной печати полностью отражают основные результаты работы. В автореферате с достаточной полнотой изложено основное содержание диссертационной работы.

Считаю, что представленная диссертационная работа Максutowой Филозы Абдрахимовны «Магнитоэлектрический эффект в окрестности магнитных неоднородностей в пленках типа ферритов-гранатов» по актуальности решаемых задач, степени достоверности, научной новизне и практической значимости результатов, полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук (п.9 Положения о присуждении учёной степени, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а её автор – Максutowа Филоза Абдрахимовна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Доктор физико-математических наук  
по специальности  
01.04.11 – «Физика магнитных явлений»,  
ведущей научный сотрудник

 Рушана Михайловна Еремина

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».

Почтовый адрес: 420029, г.Казань, ул.Сибирский тракт, 10/7

Тел.: +7 (843) 272 05 03

E-mail: reremina@yandex.ru

Подпись Ереминой Р.М. заверяю



Подпись   
Заверяю: зав. канцелярией КФТИ - обособленное  
структурное подразделение ФИЦ Казань РАН  
 Куркина Н.Г.

05.12.2019г