

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Нугуманова Айдара Гайсовича

“Топологически устойчивые спиновые структуры в наноразмерных мультиферроиках”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Диссертация Нугуманова А.Г. посвящена актуальной проблеме теоретической физики - исследованию систем, взаимодействующих многих частиц, частный случай которых представлен широким классом магнитоэлектрических кристаллических систем, проявляющих одновременно при определенных физических условиях различные типы дальнего порядка. Такие системы проявляют уникальные физические свойства, имеющие важное практическое значение для использования в составе элементной базы информационно-вычислительной техники, микроэлектронных устройств и современных приборов для физического эксперимента. В диссертационной работе Нугуманова А.Г. исследованы различные модели магнитоэлектрического взаимодействия в тонких пленках мультиферроиков и влияния геометрии изучаемых моделей, а также конкуренции различных типов взаимодействия на формирование и устойчивость топологических магнитных вихрей, с конечной целью разработки новых запоминающих устройств на базе троичной логики.

К настоящему времени значительные перспективы демонстрируют различные магнитоэлектрические композитные мультиферроики, создаваемые путем комбинирования чередующихся ферромагнитных и ферроэлектрических нанопленок различной толщины. Следует отметить, что слоистая структура композитных мультиферроиков естественным образом обеспечивает нарушение пространственной симметрии кристалла, что способствует проявлению различных

поверхностных эффектов, локализующихся на границах между слоями с различным упорядочением. Как известно, такие эффекты в зависимости от характера и интенсивности межслойного взаимодействия, могут приводить к возникновению нетривиальных топологических магнитных наноструктур. Такие наноструктуры чувствительны к электромагнитным полям малой интенсивности и могут быть применены для создания ультраплотных спинтронных логических элементов и ячеек памяти. Таким образом, можно заключить, что исследование физических свойств композитных мультиферроиков на основе моделирования спиновых и ферроэлектрических структур представляет актуальную задачу современной теоретической физики.

Диссертация Нугуманова А.Г. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 99 страниц машинописного текста включая 42 рисунка. Список цитируемой литературы состоит из 122 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной темы. Определены объекты исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана их актуальность. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также дается краткое описание по главам.

Подробное описание особенностей фазовых переходов и критических явлений в мультиферроидных сверхрешетках приводится **в первой главе**. Здесь же приведена методология численного моделирования фазовых переходов. Приводятся результаты моделирования мультиферроидных сверхрешеток.

Во второй главе диссертации на основе классического алгоритма метода Монте–Карло показано, что скирмионы в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешетках с треугольной симметрией формируются только в области для параметра магнитоэлектрического взаимодействия

$-1.0 \leq J^{mf} \leq -0.75$ в отсутствие магнитного поля. Показано, что скирмионы распределяются в трехмерном пространстве ферромагнитного слоя. Установлено, что толщина сегнетоэлектрической пленки магнитоэлектрической сверхрешетки не влияет на устойчивость самой скирмионной структуры. Сама величина толщины определяет стабильность скирмионной структуры. В частности, результаты моделирования демонстрируют, что скирмионы формируются только для диапазона слоев магнитной пленки от четырех до шести в отсутствие магнитного поля.

В последней главе с применением искусственной нейронной сети (ИНС) изучена взаимосвязь между комбинациями параметров мультиферроиков и соответствующими конфигурациями основного состояния, используя относительно небольшое количество предварительно вычисленных конфигураций в качестве обучающих данных. Использование ИНС позволяет избежать чрезмерных вычислительных затрат при исследовании параметрического пространства и позволяет определить такие параметры, при которых возможно существование стабильных нетривиальных конфигураций основного состояния в виде скирмиона. Следует отметить, что идеальная мультиферроидная ячейка памяти открывает возможность электрической записи магнитного состояния. В этой главе изучены и другие особенности скирмионных фаз с различной топологией, возникающих при различных комбинациях обменного взаимодействия и параллельного магнитоэлектрического Дзялошинского-Мория взаимодействия.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по полученным результатам.

В качестве наиболее существенных из полученных в диссертации результатов можно выделить:

1. Получение диаграммы, демонстрирующей зависимость топологического заряда скирмионов от интенсивностей основных параметров

взаимодействия системы, в том числе обмена и взаимодействия Дзялошинского-Мории. Исследование вопроса стабильности топологически защищенных структур по отношению к различным параметрам.

2. Установление тесной взаимосвязи магнитных и ферроэлектрических фазовых переходов, имеющих различную природу значения температур переходов внутри пленок и на интерфейсе. Определение критических значений для параметров взаимодействия, при которых в системе наблюдается изменение типа фазового перехода.
3. Установление точных значений параметра магнитоэлектрического взаимодействия для которых формируются скирмионы в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешетках с треугольной симметрией.
4. Предложение алгоритма на основе искусственных нейросетей, который обеспечивает быстрый поиск для определенных устойчивых состояний в параметрическом пространстве. Определение диапазонов значений параметров взаимодействий, для которых характерно стабильное основное состояние со скирмионной решеткой.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов в диссертационной работе не вызывают сомнений.

В качестве замечаний к диссертационной работе отметим следующие:

1. В Монте-Карло исследованиях обычно температура измеряется в относительных единицах, т.е. параметры J , k_B и T не появляются в отдельности, а встречаются в безразмерной комбинации $k_B T/J$. В представленной работе на некоторых рисунках эти параметры встречаются

- в комбинации $k_B T$ (см. рис. 1.3 – 1.5). С чем связан такой выбор температуры?
2. На рис. 1.6 приведена энергетическая гистограмма вблизи критической температуры, согласно которой делается вывод о фазовом переходе второго рода. Данная гистограмма получена для системы с линейными размерами $100 \times 100 \times 4$. Для убедительности следовало бы провести гистограммный анализ данных для систем с разным набором данных $N \times N \times L$ и убедиться в том, что с увеличением L (или N) проявляемый пик становится ярче выражен и не исчезает. Такой же анализ данных было бы желательно провести для различных значений температуры вблизи температуры фазового перехода.
 3. В работе установлено, что скирмионы в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешетках с треугольной симметрией формируются в области $J^{mf} \in [-1.0, -0.75]$ отсутствии внешнего магнитного поля и распределяются в трехмерном пространстве ферромагнитного слоя. Толщина сегнетоэлектрической пленки магнитоэлектрической сверхрешетки не влияет на устойчивость скирмионной структуры и напротив, толщина магнитной пленки определяет стабильность скирмионной структуры (скирмионы формируются только для диапазона магнитных слоев в количестве от 4 до 6. Есть ли объяснение полученному численному результату?

Тем не менее, отмеченные недостатки и замечания не снижают общего хорошего впечатления о работе.

Развитые в диссертации численные методы моделирования фазовых переходов и критических явлений, а также полученные результаты вносят

существенный вклад в развитие представлений теории фазовых переходов и критических явлений.

Выявленные в диссертации диапазоны значений для параметра магнитоэлектрического взаимодействия J^{mf} в отсутствие внешнего магнитного поля имеет большое значение при получении устойчивых скирмионов в основном состоянии в магнитоэлектрических сверхрешетках.

Результаты работы являются **достоверными**, поскольку получены на основе хорошо известных и апробированных моделей и алгоритмов. **Практическая ценность** результатов состоит в том, что все они открывают предпосылки для новых решений устройств эффективной обработки и записи данных на основе скирмионов и топологических нелинейных наноразмерных структур. Кроме того, обнаруженные эффекты в мультиферроидных композитных нанопленках даст возможность дальнейшего уменьшения элементов компьютерной логики сохраняя управляемость как с помощью внешних магнитных полей, так и электрического тока. Полученные результаты открывают широкие возможности для разработки и производства новейших типов запоминающих устройств со сверхплотной записью и низкой энергозатратностью.

Основные результаты диссертации представлены в рецензируемых научных высокорейтинговых изданиях, индексируемых в международных базах данных «Web of Science Core Collection», «Scopus», так и в отечественной базе данных «РИНЦ», в том числе в таких уважаемых журналах как «Journal of Magnetism and Magnetic Materials», «IEEE Magnetic Letters» и «Letters on Materials». Результаты прошли апробацию на многочисленных международных научных конференциях и семинарах. Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности **1.3.3 – «теоретическая физика»** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1. – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в

Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова; она оформлена согласно положениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,

В целом, диссертационная работа «Топологически устойчивые спиновые структуры в наноразмерных мультиферроиках» удовлетворяет всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям, а ее автор, Нугуманов Айдар Гайсович, **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, доцент по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», ведущий научный сотрудник Института физики Х.И. Амирханова –обособленное подразделение ФГБУН Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Бабаев Альберт Бабаевич

Адрес места работы: 367015, Российская Федерация, г. Махачкала, ул. Ярагского, 94. Тел. +7 (8722) 62-89-60 email: dagphysics@mail.ru

Подпись ведущий научный сотрудник Института физики Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук А.Б. Бабаева, удостоверяю: