

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Магадеева Евгения Борисовича «Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Магадеева Е.Б. посвящена исследованию вихреподобных структур в планарных магнетиках. Данные структуры могут обладать топологической устойчивостью, что позволяет использовать их при проектировании и реализации ячеек долговременной памяти для вычислительных устройств. В настоящее время электронная база вычислительных комплексов основана на полупроводниковых устройствах. В последнее время наблюдается значительное снижение темпов роста производительности компьютерной техники, построенной на классической элементной базе. В связи с чем становится актуальным поиск альтернативных методов хранения и передачи информации, основанных на иных физических принципах.

Магнитные материалы традиционно используются для производства устройств долговременного хранения информации. Однако классический подход основан на перемагничивании отдельных доменов, что накладывает существенные ограничения на увеличение плотности записи информации. В последние годы активно изучаются возможности создания в ферромагнитных материалах более сложных устойчивых структур, характеризующихся несколькими состояниями. Такой подход позволяет увеличить плотность записи информации и перейти от двоичной логики представления информации к троичной логике, обладающей более высокой информационной емкостью. Вихреподобные структуры в планарных магнетиках обладают всеми нужными свойствами. Основная задача состоит в изучении условий формирования вихреподобных структур и управления их состоянием. Эта задача может быть решена выбором магнитных материалов с заданными свойствами, а также их наноструктурированием. Управление вихреподобными структурами может осуществляться с помощью электрических и магнитных полей. Эти вопросы требуют детального теоретического изучения, которое послужит базой для дальнейших экспериментальных исследований и создания новых технологий.

Входящий ИПСМ
№ 68
от 17.11.2025г.

Таким образом результаты диссертационной работы актуальны для развития новых направлений электроники и имеют прикладное значение.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертация содержит 312 страниц, состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы.

Первая глава носит обзорный характер, в ней представлены основные сведения о топологически защищенных структурах в магнитных материалах, приведена их классификация, а также условия зарождения и уничтожения.

В следующих шести главах изложены результаты исследований соискателя.

Во второй главе рассмотрены структура и устойчивость вихреподобных неоднородностей в пленках планарных магнетиков с топологическими особенностями. Рассмотрены нетривиальные магнитные структуры в перфорированных пленках с анизотропией типа «легкая плоскость». Для случая двух круглых отверстий представлены континуальная и дискретная модели. В рамках модели Гейзенберга показана возможность реализации трех топологически защищенных состояний, разрушение которых требует преодоления энергетического барьера. Существование подобных структур также подтверждается для случая четырех круглых отверстий. Также рассмотрено влияние структурных дефектов на топологически защищенные состояния. Рассмотрены дефекты цилиндрической и прямоугольной формы. Для полученных нетривиальных топологических структур рассмотрены вопросы их устойчивости в зависимости от параметров пленки с порами. В конце главы приведены оценки устойчивости для конкретных материалов.

Третья глава посвящена исследованию влияние размагничивающих полей на свойства неоднородных структур в легкоплоскостных материалах. Выделены эффекты, обусловленные планарными компонентами размагничивающих полей. Изучено влияние размагничивающих полей в случае одного и нескольких антидотов. Отдельно сделан акцент на изучении стабилизации вихреподобных структур, обусловленной анизотропией формы. Проведено моделирование и получены сценарии потери устойчивости. После этого исследуются трансформации неоднородных структур под действием нормальных компонент размагничивающих полей. Рассмотрен вклад размагничивающих полей в магнитную структуру и энергию пленок конечной толщины.

В четвертой главе рассмотрено влияние внешнего магнитного поля на топологически защищенные структуры в планарных ферромагнетиках. Изучена устойчивость неоднородных структур относительно воздействия однородных магнитных полей. Получены решения в приближении слабых полей, модели одного антидота и модели «кренделя». Изучено изменение топологии распределения намагниченности под влиянием полей, создаваемых электрическими токами. Рассмотрен базовый механизм изменения топологии, а также механизм перемагничивания в случае двух и четырех отверстий. Выявлены достаточные условия реализации процессов перезаписи состояний в ячейках. Рассмотрены стабильные состояния ячеек под воздействием токов и динамические свойства магнитных неоднородностей под воздействием импульсов магнитного поля. Предложена физическая модель ячейки памяти. Предложен подход к считыванию состояния ячейки. Выполнены аналитические расчеты и численное моделирование отклика ячейки.

Пятая глава посвящена одномерным магнитным структурам в пленках планарных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием. Рассмотрен процесс зарождения 0-градусных доменных границ в планарных магнетиках в поле заряженного проводника. Изучена динамика 180-градусных доменных границ под влиянием неоднородных электрических полей. Получены условия равновесия и динамические характеристики доменных границ.

В шестой главе исследуются вихреподобные структуры в пленках с одной перфорацией под воздействием внешнего электрического поля. Рассмотрена топология стабильных и метастабильных структур при наличии магнитоэлектрического взаимодействия. Рассмотрены структуры в поле заряженной нити и выявлены их устойчивые состояния. После этого изучена трансформация магнитных неоднородностей, обусловленная влиянием однородного электрического поля для различных приближений.

В седьмой главе исследуется изотропное неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие в пленках планарных магнетиков. Рассмотрены особенности проявления флексомагнитоэлектрического эффекта вблизи границ образца. Рассмотрены структура и энергия неоднородности, а также общие свойства магнитной структуры. Рассмотрено несколько случаев: область повышенного потенциала, поле точечного заряда, поле диполя, планарные электрические поля. Рассмотрены возможности управления топологией вихреподобных структур в перфорированных

пленках с помощью электрических полей. Изучено возникновение нескомпенсированных электрических зарядов, обусловленное неоднородностью распределения намагниченности. Выполнена идентификация топологии вихреподобных структур на основе индуцированных ими электрических полей. Изучена возможность спонтанного зарождения вихреподобных структур.

В Заключение обобщены основные результаты диссертационного исследования.

Следует отметить целостность текста диссертации как на уровне постановки задач, так и поиска их аналитических решений. Изложение материала в диссертации математически строгое, все выводы обоснованы.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность основных выводов и положений

Основные положения и выводы работы являются обоснованными, они базируются на физически обоснованных теоретических моделях, с применением феноменологического подхода и расчетами с применением пакета микромагнитного моделирования OOMMF. Используемые методы хорошо зарекомендовали себя при описании магнитных веществ.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 статьях в журналах, включенных ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов и индексируемых в Российских и международных базах цитирования.

Новизна исследований и полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна результатов диссертации состоит в получении ряда результатов, наибольший интерес из которых представляют следующие:

1. Наличие пары близкорасположенных наноразмерных пор в пленке приводит к формированию долгоживущих магнитных топологических структур. При этом существует три типа структур с наиболее низкими значениями энергии.

2. Структурные дефекты в пленках приводят к формированию таких же магнитных топологических структур, как и нанопоры. Данный результат

дает два альтернативных подхода к созданию материалов, в которых формируются устойчивые вихреподобные структуры.

3. Анизотропия формы может также приводить к формированию устойчивых магнитных вихреподобных структур.,

4. Электрический ток, пропускаемый через нанопоры в тонкой магнитной пленке, может изменять топологию магнитной структуры.

5. Внешнее электрическое поле приводит к движению доменных границ в магнитной пленке с антидотами при ненулевой второй напряженности поля по пространственным координатам.

6. Поле заряженного проводника, проходящего сквозь пленку легкоплоскостного магнетика, может стабилизировать вихреподобные неоднородности с произвольным топологическим зарядом.

7. Магнитная структура с любой топологией может быть реализована в перфорированной пленке планарного магнетика с помощью внешнего электрического поля. Параметры внешнего поля определяются выбранной топологией магнитной структуры.

Научная значимость полученных автором диссертации результатов

Теоретическая значимость диссертации состоит в получении результатов, описывающих топологически устойчивые структуры в тонких ферромагнитных пленках с решеткой антидотов.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы при проектировании элементов памяти с троичной логикой.

Исследования, проведенные в диссертации поддержаны Государственным заданием на выполнение научных исследований лабораториями (приказ MN-8/1356 от 20.09.2021), а также Государственным заданием №075-03-2024-123/1 от 15.02.2024, тема № 324-21.

Замечания по работе

1. При оценке работы, необходимой для разрушения состояния, в диссертации (страница 52) присутствует фраза «Подбирая более сложные преобразования с использованием численных методов, эту оценку можно улучшить до 1.0». Если эти преобразования являются результатами соискателя, то их необходимо привести, если используются чужие результаты, то необходима ссылка. Эти преобразования снижают оценку

работы на 30%, что может оказать значительное влияние на дальнейшие результаты.

2. В пункте 2.2.4 доказываемость эквивалентность формирования топологических магнитных структур на двух антидотах и на парных дефектах. При этом не уточняется, что понимается под дефектом структуры. Если это немагнитные примеси, то утверждение очевидно и не требует доказательства. Если дефекты представляют собой какие-то искажения кристаллической решетки, то необходимо уточнить какие. Необходимо уточнить модель дефектов.

3. В разделе 3.2.3 упоминается, что результаты расчетов условий устойчивости вихреподобных структур в перфорированных пленках пермаллоя носят оценочный характер из-за того, что они могут зависеть от конкретных размеров рассматриваемого образца. Как именно влияет на условия устойчивости увеличение или уменьшение размеров пленки?

4. В разделе 4.2.7 описаны изменения устойчивых состояний системы при изменении величин токов, пропускаемых через отверстия. В то же время ряд предшествующих разделов главы 4 посвящен анализу динамических явлений, вызываемых влиянием токов. Как результаты, полученные в этих разделах, согласуются между собой?

5. В разделе 4.3.3 предлагается приближенный способ оценки значения ЭДС индукции, не учитывающий явно вклад от напряженности размагничивающих полей. Можно ли указать пределы применимости такого приближения?

6. Насколько реалистично принимаемое в работе предположение, что в одном и том же материале могут наблюдаться одновременно сильная легкоплоскостная анизотропия и неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие?

Заключение

В целом, несмотря на указанные замечания, представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая может рассматриваться как научное достижение, состоящее в существенном вкладе в развитие теории вихреподобных структур в магнитных материалах.

Диссертация Магадеева Евгения Борисовича «Структура и свойства вихреподобных неоднородностей в перфорированных пленках легкоплоскостных магнетиков с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием» является законченным научным исследованием,

обладающим научной новизной и практической значимостью, что соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, а её автор – Магадеев Евгений Борисович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент: Профессор кафедры «Физика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», д.ф.-м.н., профессор


30.10.2025

Сергей Викторович Белим

Рабочий почтовый адрес: 644050, г. Омск, пр. Мира 11

Рабочий телефон: (3812) 65-22-92

e-mail: belimsv@omgtu.ru

Докторская диссертация защищена по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Подпись профессора Белима Сергея Викторович
Ученый секретарь ФГАОУ ВО ОмГТУ Немцова


