

Отзыв

Официального оппонента, доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой теоретической физики ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет» **Вахитова Роберта Миннисламовича** на диссертационную работу **Руденко Романа Юрьевича «Динамические свойства вихревых структур намагниченности в нано-, микроточках»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Руденко Р.Ю. «Динамические свойства вихревых структур намагниченности в нано -, микроточках» посвящена проблеме совершенствования технологии изготовления массивов нано - и микроэлементов и изучения их магнитодинамических характеристик.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по разработке и внедрению нового поколения запоминающих устройств со сверхплотной записью информации и произвольного доступа. Считается, что одним из перспективных технологий, развиваемых в данном направлении, является использование в качестве физических носителей бита информации магнитных вихрей, на основе которых возможна создание достаточно дешевой энергонезависимой оперативной памяти с произвольной выборкой, а также быстродействием и плотностью записи, сравнимой со статической памятью SRAM. Другим возможным направлением применения пленочных микро- и наноточек с магнитными вихрями является биомедицина, в которой они могут быть использованы в качестве носителей лечебного препарата, в частности, в онкологии для адресной микрохирургии злокачественных новообразований.

Магнитные вихри, представляющие разновидность 2 D-топологических солитонов, были обнаружены в наноразмерных пермалловых дотах в 2000 году и сейчас активно изучаются. В данной области исследований накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал, который позволяет перейти к практическим разработкам соответствующих устройств магнитной памяти. При этом, необходимо отметить, что вклад отечественных учёных в этих исследованиях невелик. Из сказанного следует, что тема диссертационной работы Руденко Р.Ю. актуальна и находится на переднем крае тех научных исследований, которые могут привести к новым прорывным технологиям в нанoeлектронике, в биомедицине и т.д.

[Вх.№356-03/6215-49](#)

[от15.05.2018 г.](#)

Структура диссертации является общепринятой, отдельные ее части логически связаны, оформлены в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ. Диссертация состоит из введения, постановки цели и задач, четырех глав и списка литературы.

Во введение дано обоснование, актуальность работы, сформулированы цели и задачи настоящего исследования, раскрыта научная новизна и практическое значение проведенных исследований, приведены основные защищаемые положения, а также освещена апробация работы.

Первая глава является обзорной. В ней приведены основные понятия и типы микромагнитных структур, возникающих в тонких ферромагнитных пленках. Подробно изучена топология магнитных вихрей, условия их возникновения и устойчивости, а так же их характеристики.

Рассмотрены уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта, а также уравнения Тиля для исследования динамики кора. Приведены методы наблюдения и управления состоянием магнитного вихря, а также описаны его возможные конфигурации в наноточках различной формы.

Вторая глава посвящена экспериментальным методам, которые применялись при изготовлении и изучении ферромагнитных наноточек с вихревой структурой. Подробно изложены блок-схемы, изготовленные диссертантом спектрометра для изучения образцов методами широкополосного и узкополосного ферромагнитного резонанса. Описана методика получения изображений рельефов поверхности изучаемых пленок атомно-силовым и магнитно - силовым микроскопами. Приведены результаты исследований обоими способами, полученные в виде изображений массивов круглых квадратных и треугольных пермаллоевых нано- и микроточек и дана их интерпретация.

В третьей главе рассмотрено экспериментальное и теоретическое изучение динамики магнитных вихрей в пермаллоевых микро- и наноточках. В эксперименте исследовались резонансные свойства микро- и наноточек, изготовленных методом прямой фотолитографии. Для объяснения полученных результатов были проделаны аналитические и численные расчеты, основанные на анализе уравнения Тиля с учетом инерционного и диссипативного слагаемых. В результате такого учета значительно улучшилось согласия теоретических расчетов с экспериментом.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния взаимодействия между элементами массива наноточек на их статические и

динамические свойства. Показано, что магнитостатические поля, создаваемые элементами массива, по величине недостаточны для изменения полярности и киральности вихрей. Для выявления способов их изменения экспериментально были исследованы магниторезонансные свойства массива нанодисков на ФМР - спектрометре методом узкополосного резонанса при наложении на образец постоянного и переменных магнитных полей. Дана интерпретация обнаруженным особенностям кривых поглощения, полученным в эксперименте. Для ее обоснования были теоретически рассчитаны на основе уравнений Тилля частота кора вихря, которые при сравнении с экспериментальными данными оказались в удовлетворительном согласии. Кроме того был изучен эффект влияния постоянного поля, приложенного в плоскости образца на частоту гиротропного движения кора вихря при наличии основного магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленки.

Среди полученных результатов можно отметить следующие:

1. Усовершенствовал метод взрывной литографии для изготовления массивов нано- и микроточек различных размеров и форм, имеющих высокую адгезию и правильные геометрические формы.

2. Найдена зависимость частоты гиротропного движения кора вихря от внешнего постоянного магнитного поля, направленного нормально к плоскости пленки как экспериментальными, так и теоретическими методами. Показано, что в последнем случае учет инерциального и диссипативного слагаемых дает более лучшее согласие с экспериментом, чем без учета таковых.

3. Экспериментально обнаружено расщепление резонансной пиков, обусловленное магнитостатическим взаимодействием элементов в массиве. Проведен теоретический анализ величины расщепления, качественно согласующая с экспериментом.

4. Экспериментально найдена зависимость поля резонанса от плоскостной компоненты постоянного магнитного поля для массивов круглых и квадратных элементов и дано теоретическое объяснение полученной зависимости.

Новизна результатов, полученных в диссертации не вызывает сомнений.

Сильной стороной диссертационной работы является комплексный анализ исследуемых образцов наноразмерных пленок с магнитными вихрями: анализ полученных экспериментальных зависимостей сопровождается проведенными теоретическими расчетами, а также сравнением их результатами других авторов. Поэтому достоверность полученных диссертантом результатов также не вызывает сомнений. Для исследований автор использует современный арсенал экспериментальных методик изучения рассматриваемых систем. Результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных физических журналах (Письма в ЖЭТФ, ФТТ, ДАН, ЖММ) и неоднократно докладывались на престижных международных конференциях и симпозиумах.

Однако при прочтении диссертации возникли следующие вопросы и замечания.

1. В главе 3 говорится вначале об экспериментальном исследовании резонансных свойств пермалловых пленок с наноточками, а затем приводится теоретический расчет характерных частот вращения кода вихря на основе анализа уравнения Тили с учетом инерционного и диссипативного слагаемых. Однако сравнение результатов, полученных разными методами и представленными на рис.33 вызывает массу вопросов. Во-первых, только на рис. 33(б) приводится это сравнение, причем только для квадратных наноточек, во-вторых, обозначения кривых на обоих рисунках (*а* и *б*) одинаковые, что запутывает восприятие приведенных результатов. В третьих, почему-то не приведены аналогичные экспериментальные зависимости частот от поля для круглых и треугольных наноточек. И наконец, в выводах к третьей главе, говорится, что учет массы ядра и затухания заметно улучшил согласие теоретических расчетов и эксперимента, однако такой вывод, сделанный на основе сравнения с одной экспериментальной кривой не совсем корректен.

2. Имеется ошибочное написание формулы (42) для потенциала от квадратной микроточки. В пояснение к этой формуле утверждается, что координаты *x* и *y* являются безразмерными величинами, отнесенными к *a*. Однако в формуле (42) они складываются и вычитаются с размерной величиной «*a/2*». Если же они все-таки размерные величины, то почему-то интегрируются по безразмерному промежутку от $(-1/2)$ до $(1/2)$.

3. Насчет терминологии, приведенный на стр. 71 к подписям к Рис.39: «Пример сравнения безразмерной части модельной функции N_x и «честного»

расчета (44) от координаты $x...$ »? Что значит «безразмерная часть», «честный расчет»? Это не физические и не математические термины.

4. Ни на одном рисунке, где приведены экспериментально полученные графики зависимостей, не даны погрешности измерений.

Однако сделанные замечания не носят принципиального характера и нисколько не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом. Диссертация представляет собой законченное исследование, способное внести существенный вклад в физику магнитных явлений. Она содержит новые результаты, имеющие существенное научное значение и стимулирующие дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. Кроме того они имеют и практическое значение, т. к. они могут быть использованы при разработке устройств магнитной памяти, основанной на магнитных вихрях.

Результаты и выводы достаточно обоснованы. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Профиль диссертации соответствует формуле специальности 01.04.11 физика магнитных явлений, а сама работа по своему научному уровню, значению и достоверности новых результатов полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.20013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Её автор Роман Юрьевич Руденко безусловно заслуживает присуждение ученой степени кандидата наук по указанной выше специальности.

Заведующий кафедрой теоретической
физики ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный университет»
док. физ.-мат. наук, профессор

Вахитов Р. М.

Ученый секретарь

Баимова С. Р.

450076 Республика Башкортостан

Г. Уфа, ул. З.Валиди, 32

E-mail: VakhitovRM@Yahoo.com

Тел.: (347) 22-99-645



14.05.2018.

Сведения об официальном оппоненте
по диссертационной работе
Руденко Романа Юрьевича
на тему «Динамические свойства вихревых структур намагниченности в
нано-, микроточках», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.11 – физика магнитных явлений

Фамилия, Имя, Отчество	Вахитов Роберт Миннисламович
Ученая степень	Доктор физико-математических наук
Ученое звание	Профессор
Шифр и наименование специальности по которой защищена диссертация	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Полное наименование организации места работы	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»)
Структурное подразделение и должность	Физико-технический институт, кафедра теоретической физики, заведующий
Индекс, почтовый адрес организации места работы	450076, Республика Башкортостан, г.Уфа, ул. Заки Валиди, д.32, Башкирский государственный университет, Физико-технический институт, кафедра теоретической физики
Телефон	+7-919-615-37-43
Адрес электронной почты	VakhitovRM@Yahoo.com

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет

1. Вахитов Р.М., Солонецкий Р.В., Ларионов И.Б. Особенности поведения зародышей перемангничивания в магнитном поле в одноосных пленках. ФТТ, 2017, т. 59, № 6, с. 1089-1096.
2. Вахитов Р.М., Шапаева Т.Б., Солонецкий Р.В., Юмагузин А.Р. Особенности структуры микромагнитных образований на дефектах пленок ферритов-гранатов. ФММ, т.118, №6, с. 571-575.
3. A. I. Popov, K. A. Zvezdin, Z. V. Gareeva, F. A. Mazhitova, R. M. Vakhitov, A. R. Yumaguzin and A K Zvezdin. Ferroelectricity of domain walls in rare earth iron garnet films. J. Phys.: Condens. Matter 28 (2016) 456004 (7pp).

4. Р.М. Вахитов, Т.Б. Шапаева, Р.В. Солонецкий, А.Р. Юмагузин. Структура магнитных образований на дефектах пленок ферритов-гранатов. ДАН, 2016, т. 470, №6, с. 674 – 676.
5. Вахитов Р.М., Магадеев Е.Б., Юмагузин А.Р., Солонецкий Р.В. Устойчивые состояния магнитных неоднородностей, локализованных в области дефектов. Физика твердого тела, 2015, т. 57, в. 8, с. 1462-1466.
6. Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М. Зарождение магнитных неоднородностей на уединенных дефектах ферромагнетика. ТМФ, 2015, т.184, №1, с. 134 – 144.
7. Вахитов Р.М., Харисов А.Т., Николаев Ю.Е. Влияние электрического поля на структуру доменных границ в магнетиках с флексомагнитоэлектрическим эффектом. Доклады Академии наук, 2014, т.455, №2, с.150 – 152.
8. Вахитов Р.М., Магадеев Е.Б. Структура магнитных неоднородностей в области дефекта одноосного кристалла. Физика металлов и металловедение, 2014, т. 115, №9, с. 906 – 912.
9. Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М. Стационарные состояния неодносвязного ферромагнитного образца. Известия РАН. Серия физическая, 2013, т. 77, № 10, с. 1493 – 1495.
10. Магадеев Е.Б., Вахитов Р.М., Успенская Л.С. Влияние шероховатостей подложки на доменную структуру пермаллоя. Известия РАН. Серия физическая, 2013, т. 77, № 10, с. 1406 – 1409.

Заведующий кафедрой теоретической
физики ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный университет»
док. физ.-мат. наук, профессор

Вахитов Р. М.

Ученый секретарь
Ученого совета БашГУ



С.Р. Баимова

1. 2018