

«УТВЕРЖДАЮ»



ВРИО директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской академии наук»

_____ академик РАН Синяшин О.Г.

« 14 » 09 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Сапожникова Максима Викторовича «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

В последние два десятилетия нанофизика является быстро развивающейся областью физики конденсированного состояния, что связано как с появлением технологических основ изготовления нано и микроструктурированных объектов, так и с развитием соответствующих экспериментальных методов исследования. При этом основные усилия направлены на изучение возможности создания новых искусственных материалов, обладающих уникальными свойствами. С этой точки зрения становится важным достижение научного понимания того, как далекодействующие взаимодействия, которые во многом определяют свойства нано и микроструктурированных материалов, могут зависеть от материальных и геометрических параметров системы. Несмотря на то, что на сегодняшний день не развиты общие экспериментальные и теоретические подходы (такие как, например, в физике твердого тела) для решения задач этой области, большая практическая значимость вопроса определяет интерес к исследованию многих конкретных задач. Поэтому диссертационное исследование Сапожникова Максима Викторовича «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем», посвященное экспериментальной и теоретической разработке ряда открытых вопросов, безусловно, является чрезвычайно актуальным и практически значимым.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Она основана на 28 научных работах, опубликованных в российских и международных изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК. Список цитированной литературы из 233 наименований достаточно полно отражает состояние проблемы.

Во Введении обоснована актуальность работы и определены цели и методы решения поставленных задач, показана ее научная новизна и значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора, представлена структура диссертации.

В первой главе аналитически и методами численного микромагнитного моделирования исследуются кривые намагничивания цепочек анизотропных коэрцитивных магнитных наночастиц с магнитоэлектростатическим взаимодействием между

ними. Показано, что дальнедействующий характер взаимодействия между магнитными моментами частиц приводит к тому, что при нулевой температуре в процессе перемагничивания система проходит через последовательность метастабильных состояний с периодическими распределениями намагниченности. При этом кривая намагничивания представляет собой последовательность ступенек имеющей вид самоподобной канторовой лестницы. В случае конечной температуры узкие ступеньки, обусловленные взаимодействием удаленных магнитных частиц, исчезают, а дефекты, возникающие в магнитной структуре, приводят к расщеплению широких ступенек. Если магнитные частицы не обладают коэрцитивностью, перемагничивание системы во внешнем магнитном поле происходит термоактивационным способом.

Во второй главе исследуется, каким образом баланс энергии магнитостатического взаимодействия и энергии доменной стенки в магнитных пленках сказывается на устойчивости магнитных скирмионов. Построены соответствующие аналитические и численные модели, решение которых показало, что локальное изменение геометрии или материальных параметров ферромагнитной пленки позволяет стабилизировать решетки магнитных скирмионов высокой плотности. Изготовлены и экспериментально исследованы соответствующие образцы магнитных наноструктурированных пленок, в которых магнитные скирмионы зафиксированы при комнатной температуре.

В третьей главе экспериментально исследуются статические магнитные свойства магнитных наноструктурированных пленок, получающихся при напылении магнитных металлов на поверхность коллоидного кристалла. Данная методика позволяет получать магнитные структуры с различным периодом и толщиной, регулируя тем самым соотношение обменной, энергии, анизотропии и магнитостатической энергий системы и при этом ее магнитные состояния. Кроме того, экспериментально показано, что периодичность структуры в плоскости дает возможность возбуждения поверхностных плазмонов и исследовано влияние плазменных колебаний на магнитооптические характеристики образцов.

В четвертой главе исследованы динамические свойства (ФМР) магнитных пленок на поверхности коллоидного кристалла и решеток магнитных скирмионов. Установлено, что распространение спиновых осцилляций имеет невзаимный характер, при этом наличие невзаимности коррелирует с наличием тороидного момента в распределении намагниченности в системе. В случае решеток магнитных частиц с вихревым распределением намагниченности наличие тороидного момента проявляется в невзаимных эффектах при отражении электромагнитного излучения.

В пятой главе экспериментально исследованы процессы самоорганизации в ансамблях электростатически взаимодействующих микрочастиц, находящихся в зазоре электростатической ячейки. Исследован новый класс мягких конденсированных материалов - суспензии микрочастиц в слабопроводящей жидкости. Промежуточное значение радиуса Дебая ($1 - 100$ мкм) в системе приводит к новым, не наблюдавшимся ранее эффектам коллективного поведения и самоорганизации в системе, обусловленным электростатическим взаимодействием. Построена теория наблюдаемых эффектов, сформулированная в терминах законов сохранения числа неподвижных и двигающихся частиц с присоединенными уравнениями Навье-Стокса для жидкости.

В Заключении сформулированы основные научные результаты диссертации.

Теперь переходим к оценке диссертации и ее основных результатов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в первую очередь в следующем:

- предложены, теоретически обоснованы и экспериментально проверены методы наноструктурирования магнитных пленок, позволяющие формировать в них устойчивые при комнатной температуре и нулевом внешнем поле магнитные состояния в виде решеток магнитных скирмионов с высокой плотностью топологического заряда.

- проведено всестороннее исследование магнитных, оптических и СВЧ свойств магнитных наноструктур, образующихся при напылении ферромагнитных материалов на поверхность коллоидных кристаллов. Изготовление подобных наноструктурированных сред не требует привлечения дорогостоящих и медленных методов электронной литографии. При этом, как показано в диссертации, свойствами материала легко манипулировать, меняя толщину напыленной магнитной пленки или меняя период коллоидного кристалла, который образуется в процессе самоорганизации из коллоидного раствора.

- предложен новый класс материалов - суспензии и коллоидные растворы металлических и полимерных микрочастиц в слабопроводящей жидкости. Проведено экспериментальное исследование динамической самоорганизации в ансамблях электростатически взаимодействующих микрочастиц, возбуждаемых внешним электрическим полем, обнаружены новые не наблюдавшиеся ранее эффекты коллективного поведения. Построена адекватная теоретическая модель наблюдаемых явлений

Среди наиболее важных **практических результатов**, полученных в диссертации, можно отметить:

- развитые представления о влиянии магнитостатического взаимодействия на свойства ансамблей магнитных наночастиц могут быть использованы при разработке устройств с высокой плотностью магнитной записи.

- предложенные механизмы стабилизации магнитных скирмионов в пленках переходных металлов могут быть использованы для создания систем с высокой плотностью топологического заряда при комнатной температуре.

- обнаруженные эффекты невзаимности в системах с изменяемым тороидным моментом в распределении намагниченности могут быть использованы для разработки невзаимных оптических или СВЧ элементов.

- обнаруженные механизмы самоорганизации в коллоидных растворах металлических и полимерных частиц могут быть использованы для развития технологий конденсированных "мягких" материалов.

По работе можно сделать следующие **замечания**:

Основные:

1. В Главе 1 (разделы 1.1.1 -1.1.3) в результате теоретических исследований автором разработана модель перемагничивания цепочек магнитных анизотропных коэрцитивных однодоменных частиц с магнитостатическим взаимодействием между ними. Представленная модель демонстрирует чередование узких и широких ступеней на кривой намагничивания. В этой же модели учитывается вклад тепловых флуктуаций и разброс величин коэрцитивных полей магнитных в формирование ступенек на кривой намагничивания. Однако в работе не приведены соответствующие экспериментальные данные (пусть, полученные даже другими авторами), совпадение с которыми подтвердили бы справедливость полученных в работе теоретических результатов. Такая же ситуация на стр. 41 (раздел 1.3.), где диссертант утверждает, что: «Поведение модельной системы полностью соответствует наблюдаемому в эксперименте поведению решетки магнитных нанодисков.....», не приводя даже литературные ссылки на соответствующие экспериментальные результаты.

2. В Таблице 1.1. (стр.44) приведены конкретные размеры исследованных наночастиц, используемых в эксперименте. На основе только экспериментальных МСМ изображений делаются выводы о вихревой и однородной намагниченности частиц. Однако почему-то автор не счел нужным провести расчеты и привести модельные МСМ изображения таких частиц в различных внешних магнитных полях, что позволило бы ему более убедительно объяснить появления ступенек на кривых магнитосопротивления изучаемых гетероструктур.

3. В главе 2 автор не приводит достаточно убедительного объяснения, почему на одном МСМ скане, от одного и того же образца (стр. 84. рис.2.22, сканы I – IV) наблюдаются на МСМ изображении различные магнитные области: а) однородно намагниченная область пленки с намагниченностью против поля. б) область, где пленка между выступами перемагнитилась, а сами выступы сохранили первоначальное направление намагниченности. с) область, где и пленка и выступ перемагнитились, и соответственно, намагничены однородно в направлении перемагничивающего поля.

4. На основе теоретических исследований и модельных расчетов автор утверждает, что в рассматриваемых им в главе 2 структурах возможно формирование двух типов стабильных магнитных скирмионов: OV - вихрь с противоположным кором, MB – цилиндрический магнитный домен. OV и MB имеют интегральный топологический заряд равный 1, соответственно они являются магнитными скирмионами. Однако приведенные в главе 2 экспериментальные результаты подтверждают образование только MB – скирмионов (рис.2.23, стр.87).

5. В главе 3 не приведены оценки возможного вклада в магнитные и оптические свойства второго (нижнего) металлического слоя, который формируется при осаждении металла через открытые поры между коллоидными частицами. Аппроксимация сформированных нанополусфер плоскими круглыми частицами позволила автору оценить конкурирующий вклад магнитостатического обменного взаимодействия в формирование наблюдаемой вихревой и однородной намагниченности в частицах. Однако желательно было бы оценить насколько справедлив такой переход от реальной 3D структуры к модельной 2D структуре. По нашему мнению, использование Ag для формирования пленки (вместо кобальта) на поверхности коллоидного кристалла, позволило бы диссертанту более

наглядно продемонстрировать влияние плазмонных колебаний на магнитооптические свойства образцов.

6. В главе 4 (раздел 4.2) анализируются рассчитанные модельные спектры ферромагнитного резонанса решетки магнитных скирмионов и ничего не говорится об экспериментальных спектрах ФМР – были ли вообще попытки их получить или же чувствительности спектрометра ФМР было для этого недостаточно?

7. В главе 5 приведено недостаточно подробное описание эксперимента, (особенно в начале главы). Например, не ясно, как измерялась площадь частиц (S) и в каком интервале изменялись ее реальные размеры со временем. На рис.5.2 и 5.4 значения S приведены только в относительных единицах. Если S площадь поверхности кластера, аппроксимированного сферой, то $S=4\pi R^2$, а не $S=\pi R^2$, как указано автором в начале стр.150. Из текста на рис. 5.7 также не понятно какова реальная величина в мкм средней площади кластера $\langle A \rangle$.

В диссертации имеются мелкие неточности. В частности:

- на стр.18 и 20 под обозначением (1.1) фигурируют разные формулы;
- на стр. 35 – также две разные формулы под одним номером (1.33);
- на стр. 25 – в тексте ссылка на рис. 1.3, но рис.1.3 отсутствует (есть только рис. 1.2 и рис. 1.4);
- в некоторых случаях имеется несоответствие систем единиц измерений. На стр. 60 константа анизотропии для образца с легкой плоскостью записана в СИ, а значение намагниченности насыщения записано в СГС. Аналогичная путаница на стр.61: на рис.2.7 значения константы анизотропии в СИ, а в подписи к рисунку в СГС.
- на стр. 86 – в тексте имеются ссылки на рис.1а и рис.4. на которых должны быть приведены рассчитанные кривые перемагничивания, однако сами рисунки отсутствуют;
- на рис 4.9 и 4.10 (стр.127 и 130) трудно понять какие линии тонкие, а какие толстые, так как они отличаются по цвету, а не по толщине;
- внутри ячейки с зазором 1.5 мм, автор (из-за опечатки) разместил сферические частицы размером 120 мм (стр.160) вместо частиц размером 120 мкм.

Однако отмеченные недостатки не снижают практическую и научную ценность работы в целом.

Подводя итоги можно констатировать, что диссертация Сапожникова М.В. представляет собой оригинальное и завершённое исследование физики микро и наносистем систем с дальнедействующими взаимодействиями. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в таких научных учреждениях как Институт физики металлов УрО РАН, Институт физики твёрдого тела РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казанский (Приволжский) федеральный университет.

Работа докладывалась на открытом заседании Ученого совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (далее КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН) 05 сентября 2018 года (протокол № 22).

На заседании присутствовало 32 специалиста, среди них 15 докторов наук, 17 кандидатов наук, аспиранты, студенты. Основным выводом Ученого совета состоит в том, что работа Сапожникова М.В. выполнена на высоком научном уровне, результаты оригинальны и достоверны, обладают высокой научной и практической значимостью.

Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации, ее результаты и выводы. Все результаты исследований опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором, докладывались на престижных научных семинарах и конференциях.

Учитывая актуальность темы проведенных исследований, строгую обоснованность результатов диссертации, их научную значимость, можно заключить, что диссертационная работа «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Сапожников Максим Викторович - заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Текст отзыва составил:

Главный научный сотрудник лаборатории
физики и химии поверхности КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
д.ф.-м. наук, профессор
e-mail: a_bukharaev@mail.ru
тел: (843) 231-91-07

А.А.Бухараев

Подпись А.А.Бухараева заверяю
Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН
к.х.н.
e-mail: sufia@mail.ru
тел: (843) 231-90-08

С.А. Зиганшина

Ученый секретарь КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
д.ф.-м.н
e-mail: vio@kfti.knc.ru
тел: (843) 231-90-86

В.К.Воронкова

Федеральное государственное бюджетное
учреждения науки «Федеральный исследовательский центр
Казанский научный центр Российской академии наук»
420111 Казань, ул. Лобачевского, 2/31
тел: (843) 292-75-97
Факс: (843) 272-77-45
www.knc.ru
e-mail: presidium@knc.ru

Список основных публикаций

работников Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской
академии наук» по теме диссертационной работы Сапожникова Максима Викторовича
«Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении
микро и наносистем», представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного
состояния

1. V. Sakhin, E. Kukovitski, I. Garifyanov, R. Khasanov, Yu. Talanov, G. Teitel'baum / Local magnetic moments in the topological insulators // Journal of Magnetism and Magnetic Materials V. 459, Pages 290-294 (2018).
2. Камашев А.А., Лексин П.В., Шуманн И., Томас И., Гемминг Т., Катаев В., Бюхнер Б., Гарифуллин И.А./ Оценка степени спиновой поляризации ферромагнетика по данным исследования эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик // Письма в ЖЭТФ, 2017, Т. 106, в. 12, С. 769–774 (2017).
3. G. B. Teitel'baum, / The phenomenological view at the two-component physics of cuprates // JETP Letters, V.106, p.p.199–208 (2017).
4. K.M. Salikhov / Consistent Paradigm of the Spectra Decomposition into Independent Resonance Lines // Applied Magnetic Resonance 47 (11), Pages 1207-1227 (2016).
5. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А. / Магнитная структура никелевой нанопроволоки после воздействия импульса тока высокой плотности // Физика твердого тела, Т. 58, No. 5, С. 917–922 (2016).
6. A.P. Chuklanov, N. I. Nurgazizov, D. A. Bizyaev, T. F. Khanipov, A. A. Bukharaev, V. Yu. Petukhov, V. V. Chirkov and G. G. Gumarov / Investigation of strain-induced magnetization change in ferromagnetic microparticles // Journal of Physics: C. V. 714. Pages 012006 (1-4) (2016)
7. Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, Ю. Е. Кандрашкин, Л. В. Мингалиева, Н. И. Нургазизов, Т. Ф. Ханипов / Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя // Письма в ЖТФ, Т. 42, вып. 20. С.24-32. (2016)
8. Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, С. А. Зиганшина, Н. И. Нургазизов, Т. Ф. Ханипов, А. П. Чукланов / Создание литографических масок с помощью сканирующего зондового микроскопа // Микроэлектроника, Т.44 ,N 6. С. 437-447. (2015)
9. Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В. / Эффекты спиновой динамики в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите // Письма в ЖЭТФ. Т. 104, № 1-2, С. 91-96 (2016).
10. R. F. Mamin, J. Strle, D. A. Bizyaev, R. V. Yusupov, V. V. Kabanov, D. Mihailovic & A. A. Bukharaev / Magnetic field control of electric-field-induced local domain growth in manganites // Ferroelectrics V. 499, p.p.143-149 (2016).
11. N.M. Lyadov, V.V. Bazarov, F.G. Vagizov, I.R. Vakhitov, E.N. Dulov, R.N. Kashapov, A.I. Noskov, R.I. Khaibullin, V.A. Shustov, I.A. Faizrakhmanov / Structural and

magnetic studies of thin Fe57 films formed by ion beam assisted deposition //Applied Surface Science. V.378. p.p. 114-119 (2016).

12. Н.М. Лядов, А.И. Гумаров, Р.Н. Кашапов, А.И. Носков, В.Ф. Валеев, В.И. Нуждин, В.В. Базаров, Р.И. Хайбуллин, И.А.Файзрахманов. / Структура и оптические свойства ZnO с наночастицами серебра // Физика и техника полупроводников. Т.50, в.1, с. 44-50 (2016).
13. Н.М. Лядов, А.И. Гумаров, Р.Н. В.Ф. Валеев, В.И. Нуждин, В.А.Шустов, В.В. Базаров, И.А.Файзрахманов. / Влияние режимов имплантации ионов серебра на структуру и оптические свойства нанокристаллических пленок оксида цинка. // Журнал технической физики.Т.86, в.8, С. 118-124 (2016).
14. Alekseev A.V., Gumarov G.G., Bakirov M.M., Petukhov V.Yu., and Nuzhdin V.I. / Ferromagnetic Resonance Investigation of Magnetic Anisotropy of Ion-Silicide thin Films. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron Neutron Techniques, V.10, No.3, pp.608-611 (2016).
15. Garifullin I.A./ EPR study of superconductors. // J. Low Temperature Phys. V. 178, p.p. 243–271 (2015)

Список основных публикаций работников
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный
исследовательский центр «Казанский научный
центр Российской академии наук» заверяю

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНЦ РАН
к.х.н.
e-mail: sufia@mail.ru
тел: (843) 231-90-08

С.А. Зиганшина

