

На правах рукописи

Сапожников Максим Викторович

**ЭФФЕКТЫ МАГНИТО- И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОЛЛЕКТИВНОМ ПОВЕДЕНИИ  
МИКРО И НАНОСИСТЕМ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018 г.

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Официальные оппоненты: Кудасов Юрий Бориславович,  
доктор физико-математических наук,  
доцент, главный научный сотрудник, ФГУП  
Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИЭФ;

Логунов Михаил Владимирович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник,  
Институт радиотехники и электроники им.  
В.А.Котельникова Российской академии наук;

Пятаков Александр Павлович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, кафедра физики колебаний,  
Физический факультет, Московский государствен-  
ный университет им. М.В. Ломоносова;

Ведущая организация: Федеральное государствен-  
ное бюджетное учреждение науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский научный  
центр Российской академии наук»

Защита состоится “ 18 ” октября 2018 г. в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Институте физики микроструктур РАН — филиале ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте организации  
[http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/SapozhnikovMV/Thesis\\_SapozhnikovMV.pdf](http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/SapozhnikovMV/Thesis_SapozhnikovMV.pdf).

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” сентября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор РАН Д.Ю.Водолазов

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Важная роль, которую играют дальнедействующие взаимодействия в свойствах всевозможных систем микро и нанообъектов, была очевидна с самого начала развития нанофизики и нанотехнологии. Класс таких систем чрезвычайно широк: от адатомов на поверхности кристалла до микроскопических взвешенных частиц катализатора в колоннах химического синтеза, от упорядоченных систем магнитных наночастиц до молекул ДНК в электролитах. На сегодняшний день не существует общих подходов к экспериментальному исследованию таких систем и теоретическому решению связанных с ними задач. Тем не менее, огромный интерес к нано и микросистемам диктует необходимость исследования многих частных случаев, которые имеют, в том числе практическую значимость. Что касается физики конденсированного состояния, важно подчеркнуть, что масштаб неоднородностей искусственных структур сравним с характерными физическими масштабами однородных систем, таких как толщина доменной стенки (однодоменные частицы), длина волны света (фотонные коллоидные кристаллы), длина спиновой волны (магнонные кристаллы), длина свободного пробега носителей тока (многослойные структуры), длина экранировки Дебая (коллоидные растворы) и др. При этом кооперативные свойства конденсированных сред также определяются имеющими в них место взаимодействиями. В случае систем, состоящих из большого количества отдельных микро или нанообъектов, эту роль играют дальнедействующие взаимодействия: магнитостатическое в магнитных наноструктурах и системах магнитных наночастиц и электростатическое в коллоидных системах. Исключительно важно исследовать, как характер взаимодействия в системе зависит от ее структуры на микро и наномасштабе и наоборот, как дальнедействующие взаимодействия влияют на структуру системы. Имея такие представления, можно осознанно использовать наноструктурирование, изменение масштабных или материальных параметров системы для управления коллективным поведением нано и микросистем, что позволит получать материалы с новыми свойствами.

### Цели и задачи диссертационной работы

- Исследование свойств ансамблей магнитных наночастиц фрустрированных благодаря эффективно антиферромагнитному дальнедействующему магнитостатическому взаимодействию. Исследование влияния межчастичного взаимодействия на магнитные конфигурации самих частиц.
- Поиск ответа на вопрос, возможно ли путем правильного структурирования (геометрического или в плане изменения материальных параметров) стабилизировать магнитные топологически заряженные состояния - скирмионы в магнитных пленках в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория (DMI) в нулевом внешнем поле и при комнатной температуре. Исследование с этой целью влияния наноструктурирования магнитных пленок на баланс энергий маг-

нитостатического взаимодействия, обмена и анизотропии в различных магнитных конфигурациях. Исследование статических и динамических свойств магнитных скирмионов в магнитных наноструктурах.

- Исследование магнитных свойств (кривых намагничивания, магнитных состояний и переходов между ними) наноструктурированных магнитных пленок с большой кривизной поверхности, образующихся при напылении ферромагнитных металлов (Co, Ni, NiFe) на поверхность коллоидного кристалла. Исследование возможности возбуждения плазмонных резонансов в системе и их влияния на магнитооптический отклик структуры.
- Исследование невзаимных эффектов при распространении спиновых волн и рассеянии света в наноструктурах обладающих тороидным моментом в распределении намагниченности.
- Исследование больших ансамблей коллоидных микрочастиц с электростатическим и взаимодействием между ними. Исследование фазовых переходов, процессов переконденсации в системе частиц в электростатической ячейке (плоском конденсаторе) при различных условиях электростатического возбуждения. Исследование процессов самоорганизации в неравновесных системах коллоидных частиц в жидкой слабопроводящей среде с большим радиусом дебаевской экранировки (1 - 100  $\mu\text{m}$ ).

### Степень разработанности темы исследования

Теоретическое исследование и расчет свойств систем многих частиц с магнитостатическим взаимодействием в общем случае затруднены из-за его дальнедействующего характера. Тем не менее, в случае регулярных двумерных решеток магнитных диполей удастся рассчитать возможные основные состояния системы [1], и было показано, что в зависимости от геометрии решетки основное состояние может быть как ферромагнитным, так антиферромагнитным или микровихревым. Возможные метастабильные состояния в таких решетках были исследованы в [2]. Особенностью магнитостатического взаимодействия является его анизотропность. Вместе с его дальнедействием это может приводить к новым свойствам: в системах изотропных магнитных частиц возникают неколлинеарные состояния [3]. В системах коэрцитивных частиц эффективный антиферромагнитный характер магнитостатического взаимодействия приводит к большому количеству метастабильных состояний и фрустрированности системы. Поэтому представляется интересным исследовать процессы перемагничивания в системе магнитостатически взаимодействующих наночастиц, в том числе с учетом их коэрцитивности и при конечной температуре, а также исследовать влияние межчастичного взаимодействия на магнитное состояние индивидуальной частицы. Решению этих задач посвящена первая глава диссертации.

В то время как в системах магнитных наночастиц дальнедействующее магнитостатическое взаимодействие является единственным взаимодействием между элементами системы, в магнитных пленках оно вступает в конкуренцию с близкодействующим обменным взаимодействием, что приводит к формиро-

ванию доменной структуры. При приложении внешнего магнитного поля возможно формирование цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) с характерным размером 5 - 10  $\mu\text{м}$  [4]. При этом "мягкие" ЦМД (то есть ЦМД, которые не содержат линий Блоха в своей доменной стенке) являются магнитными скирмионами [5] и обладают топологическим зарядом, хотя сравнительно большой размер ЦМД делает среднюю плотность топологического заряда в системе низкой. Напротив, магнитные скирмионы, обнаруженные в хиральных магнетиках [6], имеют размер порядка 100 нм. Повышенный интерес к скирмионам связан с необычными спин-электронными свойствами, которые они демонстрируют, такими как топологический эффект Холла [7] или движение под действием электрических токов малой плотности [8]. Это позволяет надеяться на то, что в дальнейшем материалы, в которых реализуются магнитные скирмионные состояния, могут быть использованы при создании интегральных твердотельных устройств объединяющих в себе возможности одновременного хранения и обработки информации. В хиральных магнитных материалах скирмионы стабилизированы в них благодаря релятивистскому взаимодействию Дзялошинского-Мория, и поэтому устойчивы в узкой области низких температур, что существенно ограничивает их возможное практическое применение. Таким образом, актуальной является задача по реализации топологически заряженных распределений намагниченности при комнатной температуре и в нулевом внешнем поле в традиционных проводящих магнитных материалах, таких как пленки и сверхрешетки из чередующихся магнитных и немагнитных слоев  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe/Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ,  $\text{Ru}$ ,  $\text{Ir}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Au}$  обладающих одноосной анизотропией, но в которых отсутствует или слабо взаимодействие Дзялошинского-Мория. Исследованию вопроса, как наноструктурирование может поменять баланс между энергиями магнитной анизотропии, дальнедействующего магнитостатического и обменного взаимодействия, и можно ли в результате стабилизировать магнитные скирмионы в пленках переходных металлов посвящена вторая глава диссертации.

Еще одним современным трендом физики магнитных наносистем является переход в исследованиях от планарных структур к структурам, обладающим трехмерной геометрией, например к изогнутым поверхностям, где интересные эффекты возникают из-за взаимосвязи геометрии и топологических свойств магнитной системы [9]. Одним из способов получения сильно искривленных магнитных пленок является напыление металла на поверхность коллоидного кристалла [10], образующихся при осаждении нано или микрочастиц различных материалов ( $\text{SiO}_2$ , полиметилметакрилата) из монодисперсных коллоидных растворов. В зависимости от толщины пленки металла получается либо регулярная гексагональная решетка контактирующих магнитных нанополусфер либо сплошная гофрированная пленка. Достаточное количество работ посвящено

исследованию структур с перпендикулярной магнитной анизотропией. Были изучены их статические [10], транспортные [11] и оптические [12] свойства. В последнем случае было обнаружено возбуждение плазмонов, что приводило, в том числе, и к модификации магнитооптических спектров. В то время как свойствам структур с перпендикулярной анизотропией было уделено достаточно большое внимание, структуры с анизотропией типа легкая плоскость остались не исследованными.

Неоднородные распределения намагниченности, возникающие в магнитных структурах с конкурирующим обменным и дальнедействующим магнитостатическим взаимодействием такие, как решетки магнитных вихрей и магнитных скирмионов могут обладать не только топологическим зарядом, но и иметь тороидный момент в распределении намагниченности [13]. При этом топологически заряженные магнитные конфигурации всегда обладают ненулевым тороидным моментом [14] (хотя обратное в общем случае неверно). Вектор тороидного момента является полярным вектором, который меняет свое направление, как при инверсии времени, так и при инверсии пространственных координат. Известно, что наличие такого вектора в системе может приводить к невязным эффектам при распространении электромагнитных волн, например к гиротропному двулучепреломлению света, наблюдаемому в антиферромагнитных доменах [15], или магнитных нецентросимметричных кристаллах [16]. Аналогичным образом невязность в распространении поверхностных магнитостатических волн Даймона-Эшбаха связана с наличием вектора  $\mathbf{M} \times \mathbf{n}$  ( $\mathbf{M}$  - намагниченность,  $\mathbf{n}$  - нормаль к поверхности), обладающего необходимой симметрией. Несмотря на то, что СВЧ свойства магнитных наногофрированных пленок [17] и магнитных скирмионов обсуждаются в литературе, например [18], невязные эффекты в таких структурах потребовали отдельного исследования.

Другим, не менее интересным объектом физики конденсированных сред, в котором дальнедействующие взаимодействия играют важнейшую роль в коллективном поведении, являются гранулярные материалы и коллоидные системы. Большой практический интерес к ним связан с тем, что подобные объекты играют важную роль, как в повседневной жизни, так и широко используются в самых разных отраслях - от традиционной фармакологии до ультрасовременных медикобиологических технологий, от пищевой и строительной индустрии до нанотехнологии и микроэлектроники (как пример - электронные "чернила"). В то время как свойства равновесных коллоидных систем достаточно хорошо изучены, исследования коллоидных систем находящихся вдали от равновесия благодаря, например, воздействию внешних полей, находятся на ранней стадии. Подобные системы демонстрируют уникальные, нехарактерные для равновес-

ного состояния, свойства, такие как самоорганизацию в сложные динамические структуры или перестраиваемые коллоидные кристаллы [19]. При этом, несмотря на всю сложность исследуемых объектов, имеется возможность создания и экспериментального исследования различных модельных коллоидных систем, позволяющих контролируемо манипулировать их свойствами. Примером такой модельной системы являются ансамбли микрочастиц или коллоидные растворы в электростатической ячейке (ЭЯ). В этом случае основным дальнедействующим взаимодействием является электростатическое взаимодействие. В работе [20] была исследована поведение большого ансамбля металлических микрочастиц в ЭЯ и показано, что эффекты экранировки электростатического межчастичного взаимодействия приводят к тому, что система распадается на газ двигающихся и кластеры неподвижных частиц. Феноменологическая теория, описывающая процессы Освальдовской переконденсации при формировании кластеров микрочастиц представлена в работе [21]. Поведение систем коллоидных частиц в водных растворах при приложении внешнего электрического поля широко исследовалось [22]. В этом случае радиус Дебая составляет несколько нанометров, что приводит к экранировке электростатического взаимодействия, при этом наблюдаемые процессы самоорганизации в системе определяются самоиндуцированными электрогидродинамическими потоками [23]. В случае коллоидных растворов в слабопроводящих жидкостях радиус Дебая составляет 1 - 100 мкм, при этом возможны отклонения от объемной электронейтральности раствора. Исследование процессов самоорганизации коллоидных систем в таких растворах проведено в пятой главе диссертационной работы.

### Научная новизна

Научная новизна работы определяется оригинальностью полученных результатов, подтверждается публикациями в ведущих физических научных журналах и заключается в следующем:

Теоретически исследованы эффекты дальнедействующего взаимодействия в цепочках магнитных коэрцитивных частиц, показано, что эффективный антиферромагнитный характер диполь-дипольного взаимодействия приводит к тому, что при перемагничивании система проходит через последовательность метастабильных состояний, а кривая перемагничивания представляет собой последовательность ступенек различной ширины. При этом широкие ступеньки, соответствующие высоко симметричным состояниям, чередуются с узкими ступеньками низко симметричных состояний, а кривая в целом имеет вид самоподобной канторовой (чертовой) лестницы. Исследовано влияние дисперсии коэрцитивности частиц и тепловых флуктуаций на вид кривой намагничивания.

Исследовано влияние межчастичного магнитостатического взаимодействия на магнитные состояния отдельных частиц.

В работе впервые предложены и обоснованы методы наноструктурирования магнитных пленок переходных металлов с перпендикулярной магнитной анизотропией, позволяющие создавать в них топологически заряженные распределения намагниченности (скирмионы) в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория в нулевом внешнем поле. Проведены эксперименты, в которых эти идеи были практически реализованы. Стабилизация магнитных скирмионов обусловлена балансом энергии магнитостатического взаимодействия и энергии междоменных границ в наноструктурированной системе. Экспериментально исследованы пленки с модулированной толщиной и локально измененными материальными параметрами. Для локальной модификации материальных параметров пленки облучались фокусированными пучками ионов He. Полученные регулярные решетки скирмионов имеют высокую плотность топологического заряда (до 25-2 мкм), что приближается к значениям плотности скирмионов в хиральных магнетиках, но при этом они стабильны при комнатной температуре.

Проведено всестороннее исследование магнитных, оптических и СВЧ свойств нового магнитного наноструктурированного материала - пленок переходных металлов (Co, Ni, NiFe) на поверхности коллоидного кристалла полиметилметакрилата. Обнаружено формирование в системе фрустрированных решеток магнитных вихрей. Экспериментально продемонстрировано, что двумерная периодичность структуры магнитных пленок приводит к возбуждению плазмонных резонансов при облучении их светом, что проявляется в изменении спектров отражения и магнитооптического отражении.

Обнаружены невзаимные эффекты при рассеянии света и возбуждении ферромагнитных спин-волновых резонансов в решетках магнитных вихрей и магнитных скирмионов. Невзаимность связана с наличием тороидного момента в распределении намагниченности в системе.

Предложен новый класс материалов - суспензии и коллоидные растворы металлических и полимерных частиц в слабопроводящей жидкости, и исследованы их свойства при возбуждении электрическим полем. 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 между частицами.

**Практическая ценность** полученных в диссертации результатов заключается в том, что

- 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.

### Методология и методы исследования

Кривые намагничивания магнитных наноструктур исследовались магнитооптическими методами (измерение эффектов Керра и/или Фарадея) и методами и холловской магнитометрии. Магнитные состояния определялись методами магнитосиловой микроскопии (МСМ). Экспериментальные исследования подтверждались или, наоборот, предвлялись теоретическим анализом. Микромагнитное моделирование было проведено с использованием программных пакетов SIMMAG (ИФМ РАН) и OOMMF (NIST) основанных на численном решении системы уравнений Ландау-Лифшица. Часть задач решена аналитическими методами. Для исследования поведения ансамблей частиц электростатически взаимодействующих микрочастиц использовалась скоростная видеосъемка в электростатической ячейке с оптическим доступом.

### Положения, выносимые на защиту

1. Магнитные скирмионы могут быть стабильны в ферромагнитных пленках с перпендикулярной анизотропией при условии пространственной модуляции локальной плотности энергии доменной стенки даже в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория. Локальное изменение энергии доменной стенки может быть достигнуто путем локального изменения толщины или материальных параметров пленки.
2. В наноструктурированных многослойных магнитных пленках Co/Pt плотные решетки магнитных скирмионов с высокой плотностью топологического заряда ( $25 \mu\text{m}^{-2}$ ) могут быть экспериментально реализованы в процессе намагничивания в однородном внешнем магнитном поле. Скирмионы остаются устойчивыми в нулевом внешнем поле при комнатной температуре.
3. Магнитные статические и СВЧ свойства магнитных пленок на поверхности коллоидного кристалла зависят от соотношения толщины пленки и периода структуры и обусловлены балансом энергии обменного и дальнедействующего магнитостатического взаимодействия.
4. Магнитные наноструктуры, обладающие тороидным моментом в распределении намагниченности (решетки магнитных вихрей и скирмионов), демонстрируют невзаимный характер распространения в них света и спиновых осцилляций.

5. При облучении светом наноструктурированных пленок Co на поверхности коллоидного кристалла полиметилметакрилата происходит возбуждение поверхностных плазмонов, что проявляется в появлении резонансных особенностей в спектрах оптического отражения и магнитооптического вращения.
6. Кривая намагничивания цепочки коэрцитивных магнитных диполей с эффективным дальнедействующим антиферромагнитным взаимодействием имеет вид самоподобной канторовой (чертовой) лестницы. Температурные флуктуации приводят к дополнительному расщеплению ступеней на кривой намагничивания.
7. Система металлических микрочастиц возбуждаемых полем в электростатической ячейке демонстрирует переход от трехмерной динамики к двумерной при увеличении частоты внешнего поля. При конденсации газа возбужденных частиц в неподвижные кластеры Освальдовское созревание идет в режиме под управлением поглощающей способности поверхности кластеров (режим Вагнера) сопровождаемом эффектами парной коалесценции.
8. Коллоидная система микрочастиц в слабопроводящей жидкости (радиус Дебая 1 – 100  $\mu\text{m}$ ) в условиях электростатического возбуждения самоорганизуются в различные статические и динамические крупномасштабные структуры, ненаблюдаемые в водных растворах. Характер формирующихся структур определяется взаимодействием микрочастиц с самоиндуцированными электрогидродинамическими потоками и нескомпенсированным объемным электрическим зарядом жидкости.

### Степень достоверности и апробация работы

Все основные результаты работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН, часть результатов обсуждалась на семинарах в Argonne National Laboratory (Аргонн, США) и Korea Institute of Science and Technology (Сеул, Корея). Материалы диссертационной работы были представлены на 26 российских и международных научных конференциях, в их числе: Euro-Asian symposium "Trends in magnetism" EASTMAG-2001 (Екатеринбург), 2016 (Красноярск); March meeting of American Physical Society 2002 (Индианаполис, США), 2003 (Остин, США), 2004 (Монреаль, Канада); Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника - 2006, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018» (Нижний Новгород); Международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники-2006» (Москва), International Symposium «Nanostructures: physics and technology» -2010, 2011, 2015 (Санкт-Петербург); Научная конференция по радиофизике - 2010 (Нижний Новгород); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011» (Санкт-Петербург); International Conference on Electrodynamics of complex Materials for Advanced Technologies PLASMETA - 2011 (Самарканд, Узбекистан); Moscow International Symposium on Magnetism - 2014, 2017 (Москва); Spin Waves International Symposium - 2015 (Санкт-Петербург); International Conference STRANN - 2016 (Санкт-Петербург); Российская конференция по электронной микроскопии -

2016 (Москва); International conference «Modern development of magnetic resonance» - 2016 (Казань); IV International Workshop «Dzyaloshinskii- Moriya Interaction and Exotic Spin Structures» - 2017 (Петергоф).

#### Личный вклад автора

Определяющий при постановке научных задач, проведении экспериментальных исследований, разработке теоретических моделей, анализе полученных результатов и предоставлении их в печати. Непосредственное создание экспериментальных установок и проведение оптических, магнитооптических и транспортных измерений, анализ и интерпретация экспериментальных результатов. Постановка задач и проведение основного массива микромагнитных модельных вычислений, анализ их результатов.

При этом необходимо отметить следующее. Теоретическое исследование процессов перемагничивания в системах с дипольным взаимодействием [A1-A5] проведено совместно с А.А. Фраерманом и Ю.М. Нефедовым, постановка задачи об оптических свойствах структур с тороидным моментом в распределении намагниченности [A17, A20, A21] - совместно с О.Г.Удаловым, Е.А. Караштиным, А.А. Фраерманом. Экспериментальное исследование процессов самоорганизации в неравновесных диэлектрических коллоидных системах выполнено совместно с А. Demortière [A18]. Исследование распределения частиц в коллоидных системах по скоростям в работе [A11] проведено совместно с К. Kohlstedt, при этом использовался программный пакет "Particle tracing" предоставленный J.S. Olafsen (также использован в работе [A7]). Разработка теоретических моделей описывающих свойства коллоидных систем выполнена совместно с И.С. Арансоном в работах [A8, A10, A11] и с В. Meerson и А. Peleg в работе [A11].

Автор выражает благодарность Ю.М. Нефедову, И.А. Шерешевскому, И.Р. Каретниковой за разработку пакета численного микромагнитного моделирования SIMMAG, использованного в численных расчетах в работах [A1, A2, A3, A16], Б.Г. Грибкову, О.Л. Ермолаевой за проведение магнитосиловых измерений магнитных наноструктур [A16, A17, A24, A25], N. Becker и Т. Proslir за проведение атомно-силовых измерений коллоидных частиц [A18]. Непосредственное измерение спектров ферромагнитного резонанса магнитных наноструктур в работе [A27] было проведено Е.С. Демидовым и Л.И. Будариним.

Изготовление тонких магнитных пленок и литографированных магнитных наноструктур, исследованных в рамках диссертационной работы было выполнено при участии С.А. Гусева [A1, A4, A12, A14, A15, A16, A23, A24], Л.А. Мазо [A1, A4], А.Ю. Климова [A12], С.Н. Вдовичева [A12, A23, A24], В.В. Рогова [A12, A14, A15, A16, A20], Н.С. Гусева [A23, A24, A28], Ю.В. Петрова [A23, A24], М.Н. Дроздова [A23, A28] и Е.В. Скороходова [A28]. Исходные пленки разбавленного магнитного полупроводника, использованные при изготовлении образцов в работах [A12, A13], предоставлены Joonyeon Chang. Образцы коллоидных кристаллов, использованные в качестве подложки

при изготовлении магнитных наногофрированных пленок [A14, A15, A16, A28], предоставлены Б.Б. Троицким.

#### Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 226 страниц. Диссертация содержит 110 рисунков. Список литературы включает 233 наименования.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, изложены цели и задачи работы, методы исследования, показана ее научная новизна и значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

**В первой главе** изложены результаты цикла работ по исследованию регулярных решеток магнитных наночастиц с дипольным взаимодействием между ними. В **разделе 1.1.** теоретически решается задача о перемагничивании двумерной системы коэрцитивных магнитных нанообъектов (магнитных наночастиц, цепочек магнитных наночастиц, планарных массивов магнитных нанопроволок) с магнитостатическим взаимодействием между ними. Геометрия системы такова, что взаимодействие имеет эффективный антиферромагнитный характер и спадает степенным образом или экспоненциально. В случае массивов магнитных нанопроволок конечной длины или одиночных цепочек магнитных наночастиц с перпендикулярной магнитной анизотропией задача о перемагничивании может быть решена как кинетическая, путем правильного выбора последовательности метастабильных состояний, через которые проходит система в процессе перемагничивания. Такой выбор становится возможным осуществить однозначным образом, если система состоит из абсолютно четного числа ( $N=2^n$ ,  $n \rightarrow \infty$ ) магнитных моментов, и имеет циклические граничные условия. Рассматривая одно и многопериодические распределения магнитных моментов в одномерной цепочке, можно вычислить величины магнитных полей которые соответствуют границам устойчивости метастабильных состояний. Каждому метастабильному состоянию соответствует ступенька на кривой намагничивания, при этом широкие ступеньки, на которых реализуются короткопериодические состояния, чередуются с более узкими ступеньками соответствующими длиннопериодическим состояниям. В бесконечной системе кривая намагниченности приобретает вид канторовой (т.н. чертовой) лестницы обладающей фрактальным самоподобным характером (рис. 1). Так как магнитостатическое взаимодействие быстро убывает с расстоянием, то при конечной температуре взаимодействие между удаленными магнитными моментами может оказаться меньше величины температурных флуктуаций, что приведет к перестройке кривой намагничивания при конечной температуре. Задача о влиянии

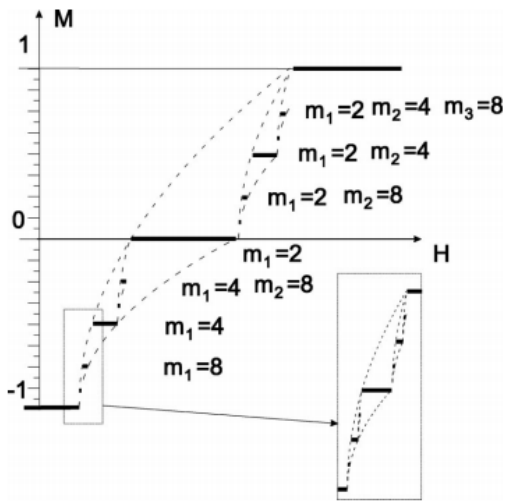


Рис. 1. Самоподобная чёртова лестница.

и невозможности достижения основного при нулевом внешнем поле антиферромагнитно упорядоченного состояния. В результате соответствующая ему ступенька на кривой намагничивания оказывается расщепленной на две (рис. 2), аналитически рассчитанная величина расщепления  $M_{st} \approx 0.134$ . Очевидно, наличие ступеней на кривой намагничивания системы магнитных моментов может быть обусловлена не только эффективным антиферромагнитным взаимодействием между ними, но и разбросом величин коэрцитивных полей магнитных моментов.

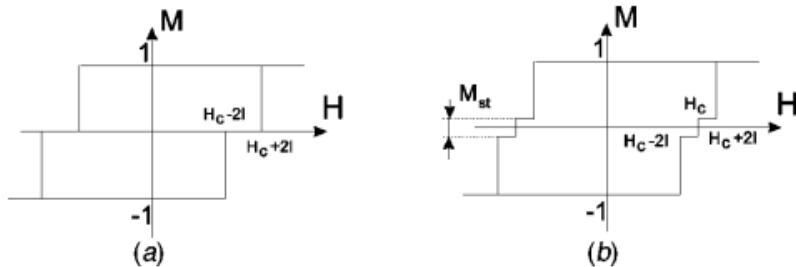


Рис. 2. Петля намагничивания цепочки магнитных моментов в случае взаимодействия ближайших соседей. (a) При  $T=0$  ступенька на кривой соответствует антиферромагнитно упорядоченной конфигурации. (b) Расщепление ступеньки из-за термофлуктуационного образования дефектов магнитной структуры.  $H_c$  - поле коэрцитивности магнитных диполей,  $I$  - поле взаимодействия между магнитными моментами.

Задача о влиянии такого разброса решена в **разделе 1.1.3**, в приближении среднего поля. Показано, что эффекты магнитостатического взаимодействия и

флуктуации коэрцитивности могут быть различены между собой при исследовании минорных петель намагничивания системы.

**Раздел 1.2** работы посвящен исследованию термоактивационного механизма перемагничивания цепочек некоэрцитивных магнитных моментов. Благодаря магнитостатическому взаимодействию магнитные моменты сонаправлены и ориентированы вдоль цепочки. Если внешнее поле направлено навстречу намагниченности, то при некоторой величине внешнего поля происходит перемагничивание системы путем когерентного вращения магнитных моментов, т.н. "развеиванием" [24]. При конечной температуре перемагничивание метастабильного состояния может также происходить через образование критического зародыша стабильной фазы и последующий его рост. Задача о перемагничивании при конечной температуре была решена методами численного микромагнитного моделирования путем решения системы уравнений Ландау-Лифшица для магнитных диполей составляющих систему с использованием программного пакета SIMMAG, разработанного в ИФМ РАН. При этом взаимодействие с термостатом моделируется добавлением на каждом узле поля тепловых флуктуаций  $\mathbf{H}_T$ . Оно является  $\delta$ -коррелированным по пространству и времени Гауссовым белым шумом,  $\langle \mathbf{H}_T(\mathbf{p}', t'), \mathbf{H}_T(\mathbf{p}, t) \rangle = \sigma^2(T) \delta(\mathbf{p}' - \mathbf{p}) \delta(t' - t)$ , зависимость дисперсии  $\sigma$  от температуры определяется флуктуационно-диссипативной теоремой и имеет вид  $\sigma^2(T) = 2\alpha kT/\gamma M_s V$  ( $\alpha$  - константа затухания в системе,  $M_s V$  - магнитный момент частицы). В ходе моделирования вычислялось время перемагничивания системы  $\theta$  при разных значениях внешнего поля и температуры. Было определено, что зависимость  $\lg\langle\theta\rangle$  от  $T^{-1}$  имеет линейный характер, что свидетельствует о термоактивационном механизме перемагничивания системы.

Те же методы численного моделирования были использованы в **разделе 1.3**, для исследования магнитных свойств пары магнитных нанодисков с магнитостатическим взаимодействием между ними. Геометрические размеры дисков выбраны таким образом, что и однодоменное и вихревое распределение намагниченности является устойчивым. Показано, что межчастичное взаимодействие приводит к тому, что кривые намагничивания системы в поле направленном вдоль оси, соединяющей частицы, и в поле поперек этой оси существенно различаются. Различия связаны с анизотропностью магнитостатического взаимодействия между частицами, что приводит к формированию либо однодоменного, либо вихревого распределения намагниченности в частицах в зависимости от выбранного направления внешнего поля. Полученные результаты позволили объяснить анизотропию кривых намагничивания экспериментально наблюдаемых в двумерных прямоугольных решетках магнитных наночастиц Co [25].

В **разделе 1.4**, экспериментально исследованы свойства цепочек магнитных наночастиц Co, расположенных на поверхности микромостика, изготовленного из пленки магнитного полупроводника GaMnAs. Показано, что магнитосопротивление мостика GaMnAs определяется магнитным состоянием частиц Co, которые могут находиться в вихревом или однодоменном состоянии. Дипольное взаимодействие между наночастицами имеет эффективный

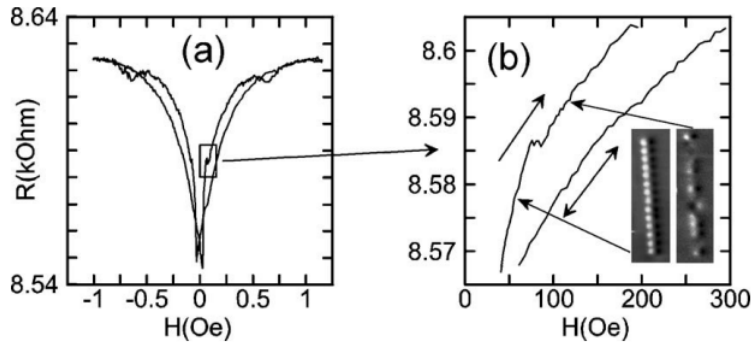


Рис. 3. (а) Поперечное магнитосопротивление образца с частицами находящимися в однодоменном состоянии. (б) Увеличенное изображение ступеньки на кривой. Стрелки обозначают направление изменения внешнего поля. На вставках показаны MCM изображения цепочки частиц Co до и после ступеньки на кривой магнетосопротивления.

антиферромагнитный характер, в результате частицы перемагничиваются не одновременно, а последовательно друг за другом при различных значениях внешнего поля. Такой характер перемагничивания системы приводит к появлению ступенек на зависимости сопротивления микромостика от внешнего магнитного поля (рис. 3). Наблюдаемые эффекты могут быть использованы в качестве альтернативных методов управления транспортными свойствами магнитных полупроводников. Результаты первой главы опубликованы в работах [A1-A5, A12, A13].

Во **второй главе** представлены результаты теоретических работ, в которых впервые были предложены и обоснованы методы наноструктурирования магнитных пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией, позволяющие стабилизировать в них топологически заряженные состояния - магнитные скирмионы в отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория, а также результаты экспериментов, в которых эти идеи были практически реализованы. В отсутствие взаимодействия Дзялошинского-Мория в нулевом внешнем поле магнитные скирмионы (они же "мягкие" цилиндрические магнитные домены, ЦМД [5]) неустойчивы и либо коллапсируют, либо трансформируются в лабиринтную доменную структуру. Это связано с монотонной зависимостью энергии скирмиона от его радиуса. Основополагающая идея заключается в том, что если создать область, в которой плотность энергии доменной стенки будет отличаться от таковой в окружающей пленке, то это может привести к локальной стабилизации скирмиона, так как поменяется баланс между его магнитостатической энергией и энергией его доменной стенки. Кроме того, наноструктурирование позволяет уменьшить диаметр устойчивого скирмиона по сравнению с радиусом обычно наблюдаемых ЦМД и тем самым повысить плотность топологического заряда в системе.

В **разделе 2.1.1.** аналитически решена задача об устойчивости одиночного

магнитного скирмиона в магнитной пленке, в которой имеется цилиндрическая область радиусом  $r_0$  с измененной величиной перпендикулярной магнитной анизотропии и/или величиной константы обменного взаимодействия. При этом зависимость энергии доменной стенки, от радиуса скирмиона имеет вид  $\sigma(r) = (\sigma_0 + \sigma_1)/2 + (\sigma_0 - \sigma_1)\tanh(2(r - r_0)/\delta)$ , где  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  - энергии доменной стенки вне и внутри центральной области радиуса  $r_0$ , а  $\delta$  характеризует пространственный масштаб, на котором плотность энергии доменной стенки меняет свое значение. В результате выведены аналитические выражения для зависимости энергии скирмиона от его радиуса. Анализ выражения для энергии позволяет получить диаграммы устойчивости скирмиона в зависимости от геометрических и материальных параметров системы (рис. 4б). При расчетах использовались значения материальных параметров характерных для магнитных пленок переходных металлов с перпендикулярной анизотропией. Видно, что в системе возможна стабилизация скирмионов достаточно малого диаметра, сравнимого по величине с диаметром скирмионов в хиральных магнитных материалах. Устойчивость скирмиона обусловлена тем, что энергия доменной стенки внутри области с меньшей анизотропией меньше, и скирмиону становится энергетически невыгодно расширяться за пределы центральной области. В то время как задача об устойчивости скирмиона в отдельной потенциальной яме возникающей в локальной области с измененной величиной анизотропии была решена аналитически, исследование системы представляющей периодическую решетку таких областей (рис. 4а) было проведено методами микромагнитного моделирования с использованием открытого программного

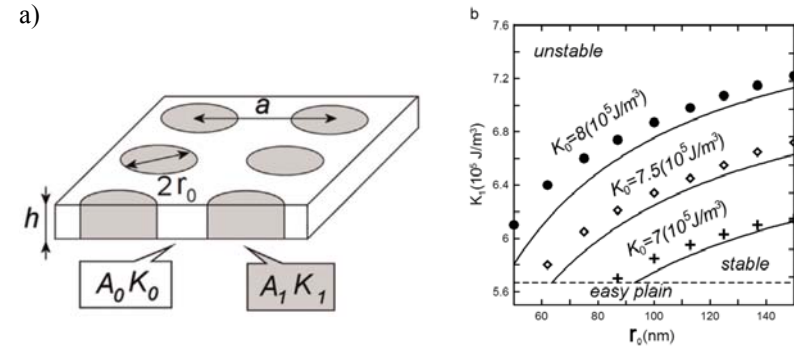


Рис. 4. а) Геометрия моделируемой наномодифицированной пленки:  $h$  - толщина пленки,  $r_0$  - радиус области с измененными параметрами материала,  $a$  - период решетки. б) Аналитически вычисленные границы областей устойчивого существования скирмиона в нулевом внешнем поле. Геометрические параметры системы следующие:  $h = 10$  нм,  $\delta = 10$  нм, намагниченность  $M_s = 950$  эрг Гс-1см-3, константа обменного взаимодействия  $A = 5 \times 10^{-7}$  эрг/см, анизотропия  $K_0 = 8 \times 10^6$  эрг/см<sup>3</sup>. Пунктирной линией обозначено значение  $K_1 = M_s^2/2$ , которое соответствует переходу к системе с эффективной анизотропией типа легкая плоскость. Результаты микромагнитного моделирования представлены символами.



кода OOMMF [26] и представлено **разделе 2.1.2**. Этот код основан на численном решении системы уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта для намагниченности системы. Полученные численными расчетами границы значений параметров системы, когда скирмион устойчив, представлены на рис. 4b. Хорошее совпадение результатов аналитических расчетов и микромагнитного моделирования взаимно верифицирует оба метода. В периодической системе стабильность скирмионов несколько выше из-за магнитоэлектронного взаимодействия между ними, что приводит к небольшому расширению области устойчивости скирмионов полученное в численных расчетах. Также были промоделированы процессы намагничивания структурированной пленки в однородном внешнем поле. Показано, что в широких пределах материальных параметров, соответствующих по значению реальным магнитным материалам, перемагничивание между однородными состояниями происходит через последовательное формирование решеток магнитных скирмионов с разной плотностью топологического заряда. При этом скирмионные решетки остаются стабильными при уменьшении внешнего поля до нуля. Согласно полученным результатам расчетов плотность скирмионного заряда в системе может достигать  $100 \mu\text{m}^{-2}$ .

В **разделе 2.1.3** представлены результаты экспериментальных работ по наблюдению магнитных скирмионов в пленках с пространственно модулированной величиной анизотропии. Исходные пленки с перпендикулярной анизотропией представляют собой многослойные структуры Co/Pt, демонстрирующие в размагниченном состоянии лабиринтную доменную структуру. Локальное изменение анизотропии достигалось при облучении пленки фокусированным пучком ионов  $\text{He}^+$ . Экспонированные ионами области имеют круглую форму диаметром 100 нм, периодически расположенные в квадратную решетку. Атомно-силовое исследование поверхности продемонстрировало отсутствие какого-либо рельефа, в то время как магнитно-силовые измерения показали возникновение периодической магнитной структуры в процессе перемагничивания пленки, в том случае, если доза облучения составляла  $2 \times 10^{15}$  ионов/ $\text{cm}^2$  или более (Рис. 5). Цилиндрическая симметрия в распределении сигнала свидетельствует о скирмионном или вихревом распределении намагниченности в облученной пучком ионов области. Кривые намагничивания структур были исследованы методами холловской магнитометрии. Сравнение экспериментальной кривой намагничивания с результатами микромагнитного моделирования позволяют утверждать, что при больших дозах облучения анизотропия меняет знак в облученной области. Это приводит к формированию решетки магнитных вихрей на фоне перпендикулярно намагниченной необлученной области. Для образца с дозой облучения  $2 \times 10^{15}$  ионов/ $\text{cm}^2$  анизотропия в облученных областях уменьшается, но не меняет знака. В этом случае наблюдается формирование решетки магнитных ЦМД. Данные МСМ сканирования подтверждают выше сказанное предположение – ЦМД видны только на фоне магнитных доменов с противоположно направленной намагниченностью, в то время как магнитные вихри видны на фоне домена независимо от направления его намагниченности (Рис. 6,

справа). Как ЦМД так и магнитные вихри с кором, противоположно направленным намагниченности окружающей пленки, являются магнитными скирмионами. Наблюдаемая плотность топологического заряда в системе -  $25 \mu\text{m}^{-2}$ .

В **разделе 2.2.1** теоретически методами микромагнитного моделирования решается задача об устойчивости магнитных скирмионов в пленке промодулированной по толщине. Модельная система представляет собой пленку с перпендикулярной анизотропией, в которой имеются углубления (глухие отверстия) или выступы цилиндрической формы, упорядоченный в квадратную или гексагональную решетку (Рис. 6). Идея заключается в том, что доменная стенка обладает большей энергией в толстых участках пленки. Соответственно, углубления будут стабилизировать скирмион, препятствуя его разрастанию в лабиринтную доменную структуру. Наоборот, локальные утолщения будут стабилизировать скирмионы в пленках, имеющих толщину меньше критической, в которых скирмионы неустойчивы по отношению к коллапсу [4]. В результате было показано, следующее. (1) При материальных параметрах (величина обмена, анизотропии, намагниченности) соответствующих существующим ферромагнитным металлам и сплавам возможна стабилизация скирмионов диаметром до 30 нм, то есть могут быть достигнуты плотности топологического заряда

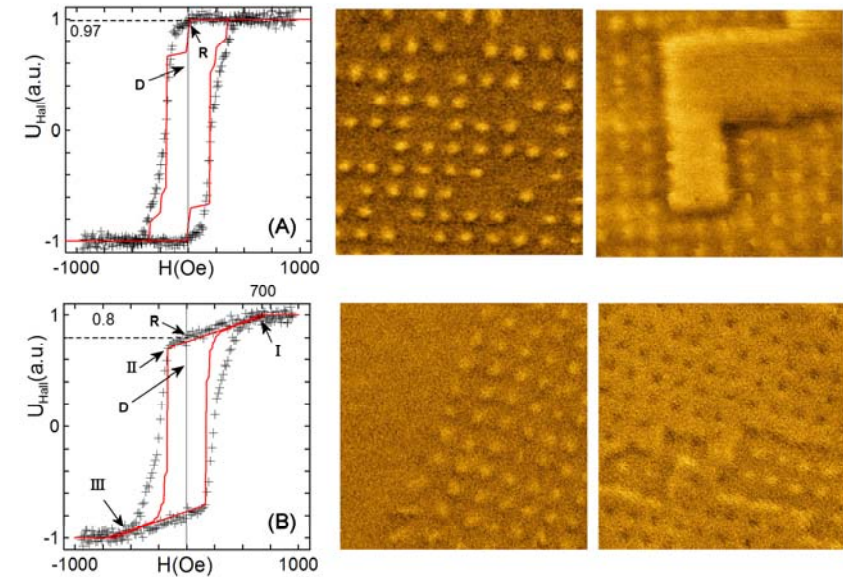


Рис. 5. Верхний ряд – данные для образца с дозой облучения  $2 \times 10^{15}$  ионов/ $\text{cm}^2$ , нижний – для образца дозой облучения  $3 \times 10^{15}$  ионов/ $\text{cm}^2$ . Слева направо : гистерезис эффекта Холла (крестики - экспериментальные данные, линия - расчет), МСМ изображение магнитной конфигурации в остаточном состоянии (точка R на графике), МСМ изображение размагниченного состояния.. Размер сканирования  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  (точка D на графике).

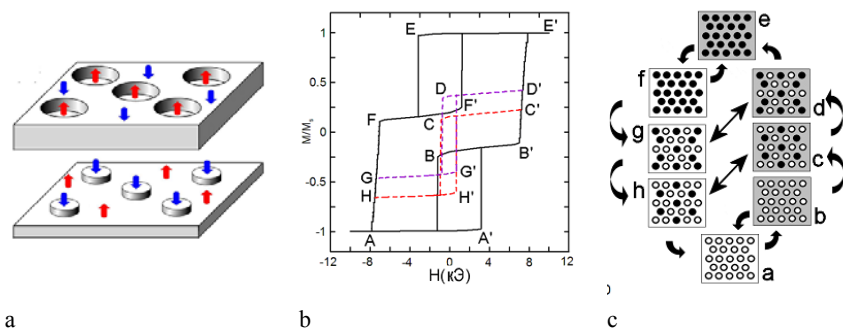


Рис. 6. а). Геометрия решетки скирмионов: цилиндрические слепые отверстия (вверху) и цилиндрические выступы (внизу), б) типичный вид кривой намагничивания гексагональной решетки цилиндрических выступов (период 120 нм, диаметр 60нм, высота 25 нм) расположенных на поверхности пленки толщиной 5нм. Пары заглавных букв А-А', В-В', С-С' и т.д. обозначают участки намагничивания соответствующие условиям стабильности скирмионных решеток приведенных на рисунке (с) и обозначенных теми же строчными буквами. с) Некоторые (наиболее симметричные) решетки скирмионов, которые последовательно образуются в ходе перемагничивания системы. Черный цвет (для выступов) и серый цвет (для пленки) обозначают намагниченность направленную вверх, в то время как области с намагниченностью, направленной вниз закрашены белым. Стрелками показаны последовательные переходы между состояниями при приложении внешнего магнитного поля.

составимые с таковыми у хиральных магнетиков. (2) Решетки скирмионов реализуются при перемагничивании системы в однородном внешнем поле, при этом они остаются устойчивыми при уменьшении поля до нуля (рис. 6б). (3) меняя величину приложенного поля можно манипулировать плотностью, симметрией решетки скирмионов, их диаметром и спиральностью (рис. 3с). (4) Спиральность скирмиона в нулевом магнитном поле зависит от геометрии глухого отверстия или выступа.

В разделе 2.2.2. представлены результаты экспериментальных исследований магнитных состояний, возникающих в процессе перемагничивания магнитной пленки с перпендикулярной анизотропией, промодулированной по толщине. Образцы представляют собой регулярную прямоугольную решетку цилиндрических выступов (период 300 нм, диаметр 150 нм) сформированных методами электронной литографии в многослойной пленке Co/Pt из чередующихся слоев Co (0.5 нм) и Pt (1 нм), всего 5 периодов. Места будущих выступов прикрывались маской в виде нанодисков ванадия, в промежутке между выступами проводилось прецизионное травление, при этом стравливалось три из пяти слоев Co. Анализ магнитных конфигураций возникающих в ходе перемагничивания наноструктурированной пленки осуществлялся методами МСМ в нулевом внешнем поле, после намагничивания системы до промежуточных значений поля, меньших, чем поле насыщения. Соответствующие конфигурации намагниченности показаны на Рис. 7. Было обнаружено, что в процессе

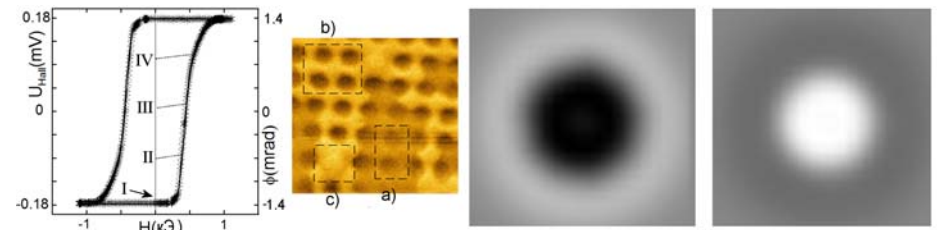


Рис. 7. Слева: петля гистерезиса эффекта Холла (сплошная линия) и магнитооптического эффекта Керра (звездочки) при намагничивании геометрически наноструктурированной многослойной пленки Co/Pt в поперечном магнитном поле. В центре: изображение магнитных конфигураций структуры полученные методом МСМ, при этом (а) однородно намагниченная область пленки с намагниченностью против поля, (б) область, где пленка между выступами перемагнитилась, а сами выступы сохранили первоначальное направление намагниченности, что соответствует скирмионной конфигурации, (с) область, где и пленка и выступ перемагнитились, и соответственно, намагниченность однородна в направлении перемагничивающего поля. Справа: рассчитанные МСМ изображения соответствующие магнитному скирмиону (б) и однородно намагниченному выступу (с).

перемагничивания структуры в однородном перпендикулярном поле в ней происходит формирование магнитных скирмионов, которые оказываются запинингованы на цилиндрических выступах и остаются устойчивыми и в нулевом внешнем магнитном поле (температура эксперимента комнатная). Микромагнитное моделирование кривых намагничивания, магнитных конфигураций возникающих в системе и соответствующих им изображений МСМ (Рис. 7, справа) подтверждает формирование магнитных скирмионов в исследуемой системе.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A19, A22 - A25, A28].

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию магнитных и оптически свойств магнитных наноструктур, образующихся при напылении пленки ферромагнитного металла на поверхность коллоидного кристалла. Поверхность исходного коллоидного кристалла представляет собой плотноупакованную гексагональную решетку полимерных (ПММА) монодисперсных по размеру наночастиц диаметром 120 - 400 нм для разных образцов. Коллоидные частицы покрывались ферромагнитным слоем (Co, Ni, NiFe) при помощи магнетронного напыления. Полученная наноструктурированная пленка представляет собой гексагональную плотноупакованную решетку магнитных нанополусфер, обладающих большой кривизной поверхности, при этом период коллоидного кристалла задает период магнитной системы. Это позволяет получить магнитные структуры с различным периодом и толщиной, регулируя тем самым соотношение обменной, энергии, анизотропии и магнитостатической энергии системы. В разделе 3.1.1 изложена технология изготовления образцов, а также представлены результаты их топографической характеристики, выполненной методами сканирующей электронной микроскопии. Типичные изображения приведены на рис. 8.

В разделе 3.1.2. исследованы магнитные состояния (методом МСМ) и кривые

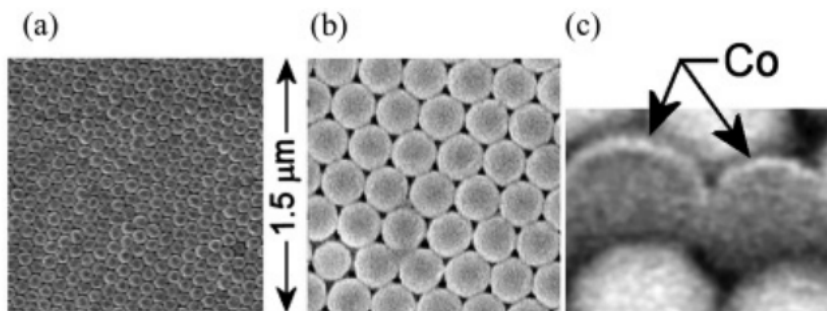


Рис. 8. (a), (b) изображения 30 нм пленки Co на поверхности коллоидных кристаллов с периодом 120 и 370 нм соответственно в электронном микроскопе. (c) Микрофотография сечения частиц, выполненного сфокусированным пучком ионов Ga<sup>+</sup>. Изображение, наблюдаемое в обратно рассеянных электронах, слой Co выделяется яркостью.

намагничивания (методами керровской оптической магнитометрии) гексагональных решеток магнитных нанополусфер Co в зависимости от их геометрии. В результате было обнаружено, что при малых размерах частиц (120 нм) в системе реализуются решетка квазиоднодоменных состояний. Состояние решетки больших по размеру полусфер (>290 нм) зависит от толщины магнитной пленки. В тонких образцах наблюдается решетка магнитных вихревых состояний. Из-за того, что решетка имеет гексагональную симметрию, магнитные вихри оказываются фрустрированными. При увеличении толщины полусфер (до 60 нм) степень их перекрытия, а значит и обменное взаимодействие, увеличивается, фрустрированная вихревая решетка становится неустойчивой и система переходит в смешанное состояние.

Результаты экспериментального исследования были подтверждены

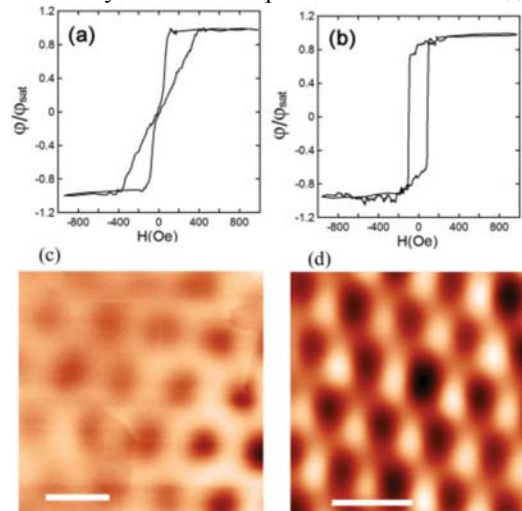


Рис 9. (a) Кривая намагничивания решетки магнитных нанополусфер с вихревым остаточным состоянием. (b) то же для системы с решеткой однодоменных состояний. (c) и (d) МСМ изображения решетки магнитных вихрей и решетки однодоменных частиц в нулевом внешнем поле

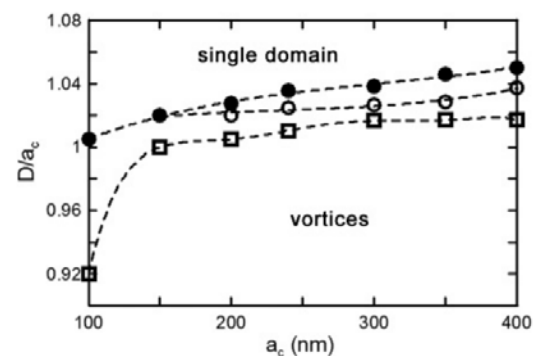


Рис 10. Рассчитанная диаграмма магнитных состояний гексагональной решетки контактирующих нанодисков Co.  $a_c$  - период решетки,  $D$  - диаметр магнитного диска. Квадраты - линия равенства энергий вихревого и однодоменного состояний. Круги - граница устойчивости решетки магнитных вихрей.

микромагнитным моделированием (раздел 3.1.3.) Была получена диаграмма магнитных состояний (Рис. 10) в зависимости от геометрии системы. Моделирование проводилось в рамках модели плоских контактирующих дисков и было выполнено с использованием программного пакета SIMMAG. Переход к дискам позволил провести расчет системы большого количества магнитных частиц, при этом она продемонстрировала все экспериментально наблюдаемые особенности поведения. Было подтверждено, что переход между магнитными конфигурациями определяется балансом обменной энергии и энергии дальнего действующего магнитостатического взаимодействия.

Характерной особенностью исследуемой системы является ее 2D периодичность в плоскости. Это позволило (раздел 3.2.) поставить задачу об экспериментальном исследовании возможности возбуждении поверхностных плазмонов в системе и изучении их влияния на её магнитооптические свойства. С этой целью было проведено измерение спектров отражения и магнитооптического вращения пленок Co и Ni на поверхности кристаллов ПММА в видимом,

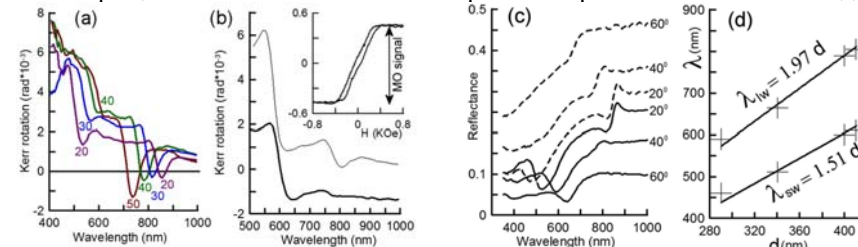


Рис. 11. (a) спектр керровского вращения для 30-нм пленки Co на поверхности коллоидного кристалла с периодом 410 нм для р-поляризации падающего света и углов падения 20°, 30°, 40° и 50°. (b) спектр керровского вращения пленок Ni (толстая линия) и Co (тонкая линия) толщиной 60 нм на поверхности коллоидного кристалла с периодом 410 нм для р-поляризованного света, падающего под углом 40°. (c) Спектры оптического отражения пленки Ni на поверхности коллоидного кристалла ПММА для s- (пунктир) и р-поляризации (сплошная линия) падающего света. (d) Масштабирование положения длинноволнового и коротковолнового резонансов в спектрах пленок Co при увеличении периода коллоидного кристалла  $d$ .

ближних ИК и УФ диапазонах для различных поляризаций падающего света, углов падения, периода структуры (120 - 400 нм) и толщины магнитной пленки (5 - 60 нм). При этом в спектрах было обнаружено 2 резонанса (рис. 11), отсутствующие в спектрах плоских магнитных пленок. Масштабирование положения резонансов в спектре с периодом структуры, сравнение экспериментально полученных дисперсионных кривых с теоретически рассчитанными позволило сделать вывод о том, что коротковолновый резонанс связан с возбуждением в системе плазменных колебаний, тогда как длинноволновый является следствием интерференции света отраженного от поверхности структуры и от 3D структуры коллоидного кристалла.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A14 - A16].

Нетривиальные магнитные конфигурации - магнитные скирмионы, магнитные вихри в магнитных нанополусферах и наночастицах обладают тороидным моментом  $T = 1/V \int [\mathbf{r} \times \mathbf{M}] dV$  в распределении намагниченности. Симметрия тороидного момента такова, что он меняет знак при инверсии времени или пространства и, соответственно, его наличие может приводить к невязимным эффектам при распространении электромагнитных волн (спиновых осцилляций или света) в системе. Исследование невязимных эффектов в магнитных системах с тороидным моментом выполнено в Главе 4. В разделе 4.1.1. проведено экспериментальное исследование спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) в магнитных пленках Co и NiFe на поверхности коллоидного кристалла. Измерения спектров ФМР выполнено методом сканирования по магнитному полю (в диапазоне магнитного поля 0 - 1,5 Тл) при фиксированной частоте внешнего СВЧ поля (9,7 ГГц). Было обнаружено возбуждение большого числа резонансных мод, отсутствующих в спектре плоских магнитных пленок той же толщины. При этом число резонансных пиков возрастает как при увеличении толщины пленки (достигая максимума при 70 нм) так и при увеличении диаметра коллоидных частиц. Характерный вид спектров приведен на рис. 12.

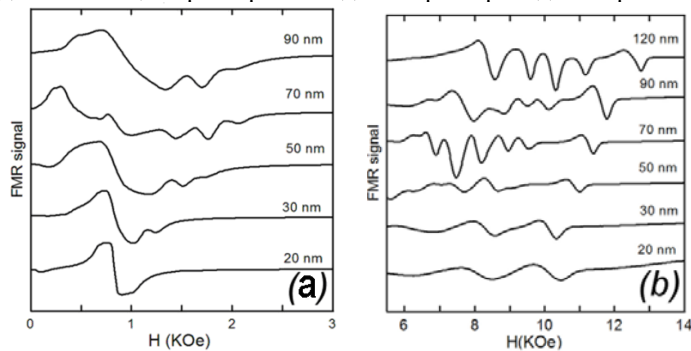


Рис. 12. Экспериментальные спектры ФМР магнитных пленок, осажденных на поверхность коллоидного кристалла (диаметр частиц 340 нм). (a) пленки Co различной толщины, внешнее поле ориентированное в плоскости пленки. (b) пленки NiFe, магнитное поле ориентировано перпендикулярно плоскости пленки.

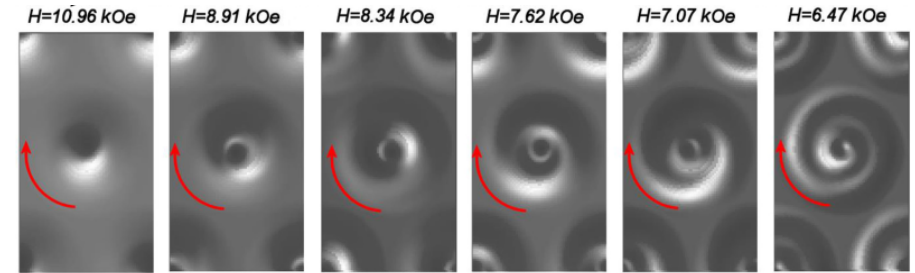


Рис. 13. Моментальные изображения переменной составляющей намагниченности лежащей в плоскости для различных возбуждаемых мод ФМР. Более светлые области соответствуют большему отклонению намагниченности. Мода совершает полный оборот по часовой стрелке за один период (вид сверху полусферы).

Для понимания структуры мод ФМР возбуждаемых в исследуемой системе в разделе 4.1.2. было проведено соответствующее микромагнитное численное моделирование с использованием программного пакета OOMMF. Рассчитанные спектры и их зависимость от геометрии системы хорошо совпадают с экспериментально полученными данными. На рис.13 представлена структура возбуждаемых резонансных мод для решетки нанополусфер ( $D = 340$  нм) пермаллоя при толщине 60 нм, когда число возбуждаемых мод максимально. По мере уменьшения внешнего постоянного поля начинают возбуждаться моды, имеющие все более развитую радиальную структуру. Интересным является тот факт, что в отличие от стоячих радиально симметричных мод резонанса в плоских дисках [27] в нанополусферах моды имеют спиральную структуру и демонстрируют прецессию. Наблюдаемая невязимость в прецессии связана с наличием тороидного момента в распределении намагниченности в магнитных нанополусферах.

В разделе 4.2. выполнен численный расчет спектров и структуры мод ФМР в решетках магнитных скирмионов, которые образуются при намагничивании пленок с периодически модулированной величиной перпендикулярной анизотропии. Геометрическая конфигурация системы (рис. 4а) и ее материальные параметры выбраны соответственно образцам, экспериментально исследованным в разделе 2.1. Рассчитаны спектры ФМР в нулевом внешнем магнитном поле для возможных магнитных конфигураций системы - однородного состояния, решетки мягких ЦМД и решетки магнитных вихрей в матрице перпендикулярно намагниченной пленки. Для анализа структуры и динамики резонансных мод рассчитывались временные реализации пространственных распределений амплитуды колебаний всех компонент переменной составляющей намагниченности при накачке на резонансных частотах. В случае однородной конфигурации намагниченность в цилиндрических областях с уменьшенной величиной анизотропии наблюдаются возбуждение стоячих радиально симметричных спиновых волн. Наличие тороидного момента в распределении намагниченности всех других конфигураций кроме однородной приводит к расщеплению

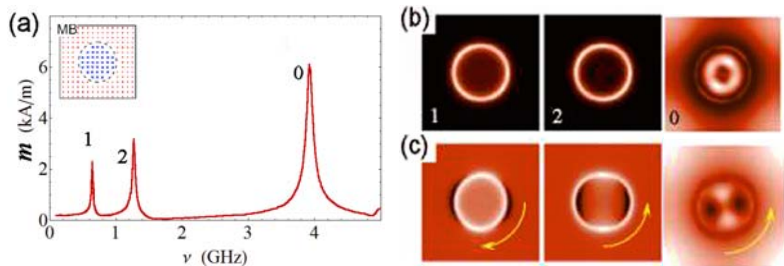


Рис. 14. (a) Характерный вид спектра ФМР мягкого ЦМД (магнитного скирмиона). Параметры системы:  $K_0 = 3.65 \times 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>,  $K_1 = 2.4 \times 10^5$  эрг / см<sup>3</sup>  $d = 50$  нм,  $l = 100$  нм. (b) Распределение амплитуды колебаний намагниченности для разных мод ФМР (обозначены теми же цифрами). Более светлые области соответствуют пучности моды. (c) Моментальные изображения переменной составляющей намагниченности  $m_x$ . В течение периода колебаний распределения намагниченности совершают полный оборот в направлении, указанном стрелками.

соответствующих резонансных мод по частоте: в результате вместо стоячих волн возбуждаются моды прецессирующие против/по часовой стрелке (рис. 14). Приложение внешнего поля перестраивает магнитную конфигурацию, что сопровождается изменением спектра ФМР. Данное свойство системы может быть использовано в перестраиваемых СВЧ фильтрах и других компонентах СВЧ электроники.

В разделе 4.3. экспериментально исследованы невязимые эффекты при дифракции света на решетке магнитных частиц находящихся в вихревом состоянии намагниченности. Частицы упорядочены в квадратную решетку с периодом 1.4  $\mu\text{m}$  (рис. 15а), что позволяет наблюдать дифракционные максимумы при рассеянии света длиной волны HeNe лазера ( $\lambda = 632$  нм). Треугольная форма частиц позволяет когерентно менять спиральность всех магнитных вихрей при перемагничивании системы во внешнем поле, ориентированном вдоль стороны треугольника, а соответственно, синхронно изменять их тороидный момент (направлен перпендикулярно плоскости). В этом случае в дифференциальном сечении рассеяния света в дифракционный максимум может наблюдаться вклад вида  $\sigma[\mathbf{k}, \mathbf{k}', \mathbf{M}(\mathbf{r})] = \dots + \chi[(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \cdot \mathbf{T}]$ , приводящий к невязимым эффектам ( $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}'$  - волновые векторы падающей и рассеянной волны). Действительно, проведенные измерения показали, что интенсивность рассеяния света в  $(\pm 1, 0)$  дифракционные максимумы меняется при изменении спиральности вихрей (рис. 15с). Другим примером магнитной структуры, которая может обладать макроскопическим тороидным моментом, является пара магнитных слоев, разделенных тонкой немагнитной прослойкой. Проведенные измерения показали, что коэффициент пропускания структуры меняется при переходе между двумя антиферромагнитными конфигурациями ( $\uparrow\downarrow$  и  $\downarrow\uparrow$ ), имеющими противоположно направленные тороидные моменты, а также меняется при изменении направления распространения световой волны. При этом сам тороидный момент

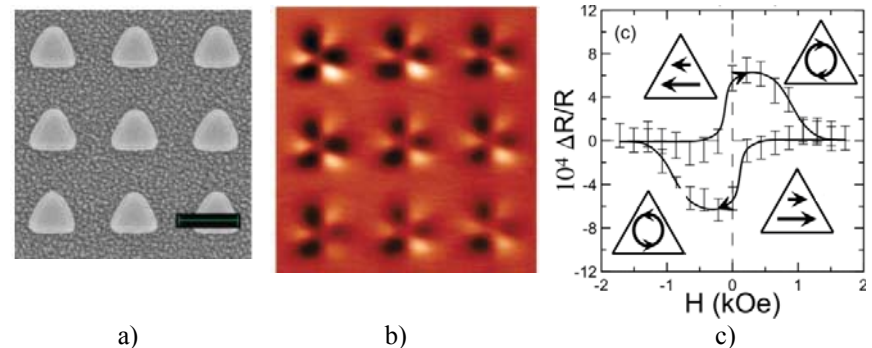


Рис. 15. (a) Изображение решетки треугольных магнитных частиц в сканирующем электронном микроскопе, длина масштабирующего отрезка составляет 1  $\mu\text{m}$ . (b) MFM изображение системы в остаточном состоянии после намагничивания вдоль основания треугольников, все магнитные вихри демонстрируют одинаковую спиральность. (c) Относительное изменение интенсивности света дифрагировавшего в  $(-1, 0)_\text{т}$  максимум в зависимости от приложенного вдоль основания треугольников магнитного поля.

ориентирован в плоскости структуры. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A17, A20, A21, A26, A27].

В то время как в главах 3,4 коллоидные кристаллы ПММА, полученные методом самоорганизации из коллоидного раствора, использовались в качестве подложек для изготовления магнитных наноструктур с магнитостатическим взаимодействием, в Главе 5 исследуются эффекты дальнегодействующего электростатического взаимодействия в самих ансамблях коллоидных металлических и полимерных микрочастиц. Объектом исследования являлись большие ансамбли микрочастиц в электростатической ячейке (Рис. 16) как с воздушным зазором, так и при её заполнении диэлектрической слабопроводящей жидкостью. В зависимости от приложенного к ячейке напряжения металлические частицы либо неподвижны, либо образуют гранулярный "газ", либо "газ" находится в равновесии с кластерами неподвижных частиц на нижнем электроде. Существование газа и кластеров обусловлено эффектами электростатического взаимодействия [20]. В главе представлены результаты цикла работ, в которых предложен новый класс т.н. мягких конденсированных материалов - суспензии и коллоидные растворы металлических и полимерных частиц в слабопроводящей жидкости, и исследованы его свойства при возбуждении электрическим полем. Промежуточное значение радиуса Дебая (1 – 100  $\mu\text{m}$ ) в системе приводит к новым, не наблюдавшимся ранее эффектам коллективного поведения и самоорганизации в системе, обусловленным электростатическим взаимодействием.

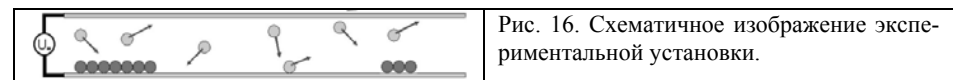


Рис. 16. Схематичное изображение экспериментальной установки.

В разделе 5.1 экспериментально исследовано поведение ансамбля металлических микрочастиц, находящихся в воздушном зазоре электростатической ячейки. Обнаружено, что динамика роста и испарения кластеров неподвижных металлических частиц, находящихся в равновесии с гранулярным газом двигающихся частиц зависит от частоты приложенного внешнего поля. Получены значения показателей критических экспонент размеров маленьких кластеров при переконденсации (Освальдовском созревании) в процессе достижения фазового равновесия. Обнаружены двумерная и трехмерная динамика системы в зависимости от размера частиц и частоты внешнего поля, а также кроссовер между двумя типами динамики в процессе переконденсации. Также была исследована динамика распределения кластеров по размеру в процессе достижения фазового равновесия. Статистический анализ полученных результатов продемонстрировал, что укрупнение кластеров происходит не только благодаря переконденсации, но и в результате коалесценции.

В разделе 5.2. Экспериментально исследованы процессы самоорганизации в системе большого числа монодисперсных металлических микрочастиц (3 - 125  $\mu\text{m}$ ) в слабопроводящей жидкости под действием приложенного постоянного электрического поля. Обнаружено формирование как статических преципитатов образованных неподвижными частицами, так и различных, не наблюдавшихся ранее в коллоидных системах, динамических структур, образованных согласованным движением большого количества частиц (рис. 17). Исследована зависимость процессов самоорганизации в системе. как от величины приложенного поля, так и от электропроводности жидкости в ячейке (рис. 18). В качестве диэлектрической жидкости использовалась смесь толуол/этанол (0 - 10%), проводимость которой возрастает при увеличении концентрации этанола. Возникновение наблюдающихся структур объясняется взаимодействием электрически заряженных микрочастиц между собой и с электрогидродинамическими потоками в жидкости. Построена теория самоорганизации систем металлических частиц находящихся в слабопроводящей жидкости под действием

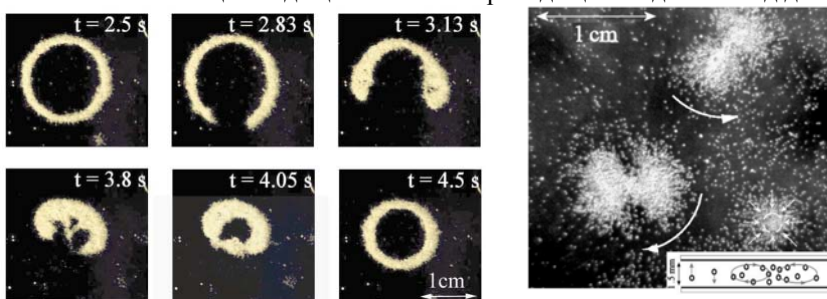


Рис. 17. Слева: эволюция динамического кластера (пульсирующего кольца) во времени. Справа: два горизонтально вращающихся тороидных вихря. Стрелки указывают направление горизонтального вращения вихрей. Маленькие стрелки показывают траектории частиц около верхней пластины ячейки в небольшом вихре. Вставка: вертикальное сечение вихревого потока тороидного вихря с потоком в центре направленным вниз.

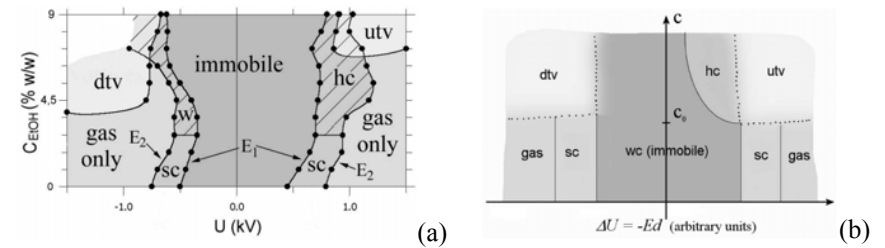


Рис. 18. Фазовая диаграмма ансамбля микрочастиц в смеси толуол/этанол: (а) - экспериментальная, (b) теоретически рассчитанная.  $U$  - приложенное напряжение (положительные значения соответствуют плюсу на верхней пластине ячейки),  $C$  - концентрация этанола. Фазовые области обозначены: sc - статические кластеры; w - кристаллы Вигнера; hc - сотовая структура; utv и dtv - тороидные вихри с потоком в коре направленным вверх/вниз.

постоянного электрического поля. Теория сформулирована в терминах законов сохранения числа неподвижных (преципитата) и двигающихся частиц (гранулярного газа) с присоединенными уравнениями Навье-Стокса для жидкости. Теория успешно описывает формирование всех экспериментально наблюдающихся в системе динамических и статических структур: гранулярных кристаллов, сотовых структур, динамических вихрей и др (рис 18b).

В разделе 5.3. Проведено экспериментальное исследование распределения металлических микрочастиц в гранулярном газе в электростатической ячейке по скоростям. Исследование проводилось методами скоростной видеосъемки с последующим компьютерным анализом треков отдельных частиц. Как для немагнитных частиц в жидкой среде, так и для магнитных частиц в ячейке заполненной воздухом обнаружено отклонение от максвелловского распределения по скоростям. Наблюдаемое поведение системы находится в хорошем соответствии с кинетической теорией диссипативного гранулярного газа. В первом случае отклонение от максвелловского распределения вызвано вязкостью жидкой среды, во втором случае - дальнедействующим магнитостатическим взаимодействием между магнитными частицами.

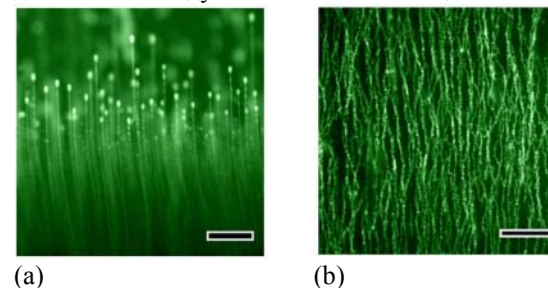


Рис. 19 (а) Обратимые самоорганизующиеся полимерные волокна («грибы»), образующиеся при низкой степени полимеризации частиц. Массив волокон растет с поверхности электрода вдоль приложенного переменного электрического поля (50 Гц, 700 В) и формирует нити с капелькой на конце. (b) Сеть переплетающихся цепочек липких коллоидных частиц с высокой степенью полимеризации (900 Гц и 700 В). Масштабирующий отрезок составляет 30  $\mu\text{m}$ .

В разделе 5.4. экспериментально исследуются свойства нового искусственного материала - сетей микроскопических полимерных волокон, которые самособираются в неводных коллоидных растворах полимерных коллоидных частиц (1-2  $\mu\text{m}$ ) под действием внешнего электрического поля. Морфология образующихся структур зависит от степени полимеризации частиц и может перенастраиваться при изменении напряженности или частоты приложенного электрического поля. Продемонстрирована возможность покрытия поверхности полученных волокон тонким слоем (12nm) проводящего оксида  $\text{SnO}_2$  при помощи методов атомно-послоевого осаждения.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [A6 - A11, A18].

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Аналитически и методами микромагнитного моделирования показано, что наноструктурирование магнитной пленки с перпендикулярной анизотропией путем локального изменения их толщины или материальных параметров может стабилизировать решетки магнитных скирмионов даже в отсутствие взаимодействия Дзялошинского - Мория. При материальных параметрах соответствующих параметрам пленок и сверхрешеток из чередующихся магнитных и немагнитных слоев Co, Fe/Pt, Pd, Ru, Ir, Cu размер устойчивого магнитного скирмиона может быть порядка 50 нм, что соответствует размеру скирмиона в хиральных магнетиках. Показано, что решетки магнитных скирмионов с высокой плотностью топологического заряда ( $> 100 \mu\text{m}^{-2}$ ) могут быть инициализированы в процессе перемагничивания пленки в однородном магнитном поле.
2. Изготовлены наноструктурированные многослойные магнитные пленки Co/Pt с перпендикулярной анизотропией. Локальное изменение анизотропии достигалось при облучении пленки фокусированным пучком ионов  $\text{He}^+$ . При этом экспонированные ионами области имеют круглую форму диаметром 100 нм, периодически расположенные в квадратную решетку. Экспериментально исследованы кривые намагничивания и магнитные конфигурации полученных образцов. Обнаружено формирование магнитных скирмионов и их решеток, которые остаются устойчивыми в нулевом внешнем поле при комнатной температуре. Плотность скирмионной решетки составляет  $25 \mu\text{m}^{-2}$ . Аналогично, формирование магнитных скирмионов было экспериментально зафиксировано при перемагничивании сверхрешеток Co/Pt периодически промодулированных по толщине.
3. Экспериментально исследованы кривые намагничивания и магнитные состояния магнитных наноструктурированных пленок образующихся при напылении Co, Ni или NiFe на поверхности коллоидного кристалла ПММА. Установлено, что возможные магнитные состояния (решетка квазиоднодоменных состояний, фрустрированная решетка магнитных вихрей, смешанное состояние) зависят от геометрических характеристик системы (периода наноструктуры и толщины магнитной пленки) и обусловлены балансом магнитостатической и обменной энергией системы. Выводы сделанные на основании эксперимен-

тальных наблюдений подтверждены микромагнитным моделированием системы.

4. Экспериментально исследованы спектры ФМР магнитных пленок на поверхности коллоидного кристалла. Обнаружены многочисленные спин-волновые резонансы, отсутствующие в спектрах ФМР плоских пленок той же толщины. Методами микромагнитного моделирования показано, что резонансные спин-волновые осцилляции демонстрируют невзаимный характер распространения в системе. Аналогичное поведение обнаружено при микромагнитном моделировании ФМР в решетках магнитных скирмионов. Экспериментально обнаружены невзаимные интенсивностные эффекты при дифракции света на решетках магнитных наночастиц с вихревым распределением намагниченности. Показано, что наличие невзаимных эффектов коррелирует с наличием тороидного момента в распределении намагниченности в исследованных системах.
5. Экспериментально зафиксированы резонансные особенности в спектрах отражения и магнитооптического вращения пленок Co и Ni на поверхности кристаллов ПММА, положение которых зависит от угла падения света и масштабируется при изменении периода структуры. Показано, что наличие резонансов связано с возбуждением в системе плазменных колебаний (коротковолновый резонанс) и с интерференции света отраженного от магнитной пленки и от 3D структуры коллоидного кристалла (длинноволновый резонанс). Исследования проводилось в видимом, ближнем ИК и УФ диапазонах для структур с периодом 120 - 400 нм и толщиной магнитной пленки 5 - 60 нм.
6. Теоретически исследованы процессы перемагничивания цепочек магнитных анизотропных коэрцитивных однодоменных частиц с магнитостатическим взаимодействием между ними. Показано, что в том случае, когда ось анизотропии частиц перпендикулярна цепочке и магнитостатическое взаимодействие имеет антиферромагнитный характер, при перемагничивании система проходит через последовательность метастабильных состояний с периодическими распределениями намагниченности. Каждому состоянию соответствует ступенька на кривой намагничивания, при этом широкие ступеньки, на которых реализуются короткопериодические состояния, чередуются с более узкими ступеньками соответствующими длиннопериодическим состояниям. В бесконечной системе при нулевой температуре кривая намагничивания принимает вид самоподобной канторовой (чертовой) лестницы. Конечная температура приводит к исчезновению узких ступенек и расщеплению широких из-за возникновения дефектов в магнитной структуре.
7. Экспериментально исследован процесс Освальдовской переконденсации в ансамбле металлических микрочастиц в электростатической ячейке. Обнаружено, что динамика роста и испарения кластеров неподвижных металлических частиц, находящихся в равновесии с гранулярным газом движущихся частиц, зависит от частоты приложенного внешнего поля. Получены значения показателей критических экспонент для размеров испаряющихся малых кластеров при переконденсации в процессе достижения фазового равновесия. Обнаружены

двумерная и трехмерная динамика системы в зависимости от размера частиц и частоты внешнего поля, а также кроссовер двумя типами динамики в процессе переконденсации. Экспериментально исследована функция распределения кластеров по размеру, показано, что она имеет вид, масштабируемый средним размером кластера, и подчиняется динамике переконденсации Вагнера с учетом процессов парной коалесценции.

8. Экспериментально исследованы процессы самоорганизации в системе большого числа металлических микрочастиц (3 - 100  $\mu\text{m}$ ) в слабопроводящей жидкости под действием приложенного постоянного электрического поля в электростатической ячейке. Обнаружено формирование как статических преципитатов, образованных неподвижными частицами, так и различных динамических структур, образованных согласованным движением большого количества частиц. Исследована зависимость процессов самоорганизации в системе от величины приложенного поля и от электропроводимости жидкости в ячейке. Возникновение наблюдающихся структур объясняется взаимодействием электрически заряженных микрочастиц между собой и с электрогидродинамическими потоками в жидкости. Построена теория, описывающая экспериментально наблюдаемые явления. Теория сформулирована в терминах законов сохранения числа неподвижных (преципитата) и двигающихся частиц (гранулярного газа) с присоединенными уравнениями Навье-Стокса для жидкости.

#### Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Fraerman, A.A. The collective behavior of circular nanomagnets / A.A.Fraerman, S.A.Gusev, L.A.Mazo, I.M.Nefedov, Yu.N.Nozdin, I.R.Karetnikova, M.V.Sapozhnikov, I.A.Shereshevskii // *Physics of metals and metallography*. - 2001. - V.91. - (Supplementary issue 1) - P.S121.
- A2. Fraerman, A.A. Numerical simulation of the dipole interaction effects in the lattices of ferromagnetic particles / A.A.Fraerman, I.M.Nefedov, I.R.Karetnikova, M.V.Sapozhnikov, I.A.Shereshevskii // *Physics of metals and metallography*. - 2001. - V.92. - (Supplementary issue 1) - P.S226-S230.
- A3. Каретникова, И.Р. Неоднородные состояния и механизм перемагничивания цепочки классических диполей / И.Р.Каретникова И.М.Нефедов, М.В.Сапожников, А.А.Фраерман, И.А.Шерешевский // *Физ. Тв. Тела*. - 2001. - Т.43. - С.2030-2034.
- A4. Fraerman, A.A. Rectangular lattices of permalloy nanoparticles: Interplay of single-particle magnetization distribution and interparticle interaction / A.A.Fraerman, S.A.Gusev, L.A.Mazo, I.M.Nefedov, Yu.N.Nozdin, I.R.Karetnikova, M.V.Sapozhnikov, I.A.Shereshevskii, L.V.Sukhodoev. // *Phys.Rev. B*. - 2002. -V.65. - P.064424-1-064424-5.
- A5. Fraerman, A.A. Hysteresis model with dipole interaction: Devil's staircase like shape of the magnetization curve / A.A.Fraerman, M.V.Sapozhnikov. // *Phys.Rev. B*. - 2002. - V.65. - P.184433-1-184433-8.

- A6. Sapozhnikov, M.V. Dynamic self-assembly and patterns in electrostatically driven granular media / M.V.Sapozhnikov, I.S.Aranson, Y.V.Tolmachev, W.-K.Kwok // *Phys. Rev. Lett.* - 2003. - V.90. - P.114301-1-114301-4.
- A7. Sapozhnikov M.V. Coarsening of granular clusters: two types of scaling behaviors / M.V.Sapozhnikov, I.S.Aranson, J.S.Olafsen. // *Phys. Rev. E*. - 2003. - V.67. - 010302-1-010302-4.
- A8. Aranson I.S. Theory of pattern-formation of metallic microparticles in poorly conducting liquid / I.S.Aranson, M.V.Sapozhnikov. // *Phys. Rev. Lett.* - 2004. - V.92. - 234301-1-234301-4.
- A9. Sapozhnikov, M.V. Self-assembly and vortices formed by microparticles in weak electrolytes / M.V.Sapozhnikov, I.S.Aranson, Y.V.Tolmachev, W.-K.Kwok. // *Phys.Rev.Lett.* - 2004. - V.93. - 084502-1-084502-4.
- A10. Sapozhnikov, M.V. Far-from-equilibrium Ostwald ripening in electrostatically driven granular powders / M.V.Sapozhnikov, I.S. Aranson, K.L. Kohlstedt, B. Meerson, A. Peleg. // *Phys.Rev.E* - 2005. - V.71. - P.011307-1-011307-5.
- A11. Kohlstedt K. Velocity Distributions of Granular Gases with Long-Range Interactions / K.Kohlstedt, A.Snezhko, M.V.Sapozhnikov, I.S.Aranson, J.S.Olafsen, E.Ben-Naim. // *Phys. Rev. Lett.* - 2005.- V.95. - P.068001
- A12. Sapozhnikov, M.V. Effect of ferromagnetic nanoparticles on the transport properties of a GaMnAs microbridge / M.V.Sapozhnikov, A.A.Fraerman, S.N.Vdovichev, B.A.Gribkov, S.A.Gusev, A.Yu.Klimov, V.V.Rogov, Joonyeon Chang, Hyungjun Kim, Hyuncheol Koo, SukHee Han, S.H. Chun. // *Appl. Phys. Lett.* - 2007 - V.91. - 062513-1-062513-3.
- A13. Jooyoung Suh, Magnetotransport properties of GaMnAs with ferromagnetic nanodots / Jooyoung Suh, Joonyeon Chang, Eun Kyu Kim, M.V.Sapozhnikov, V.L.Mironov, A.A.Fraerman. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. - 2008 -V.205. - P.1043.
- A14. Sapozhnikov, M.V. Magnetic and optical properties of nanocorrugated Co films / M.V.Sapozhnikov, S.A.Gusev, V.V.Rogov, O.L.Ermolaeva, B.B.Troitskii, L.V.Khokhlova, D.A.Smirnov. // *Appl. Phys. Lett.* - 2010. - V.96. - 122507-1-122507-3.
- A15. Sapozhnikov, M.V. Optical and magneto-optical resonances in nanocorrugated ferromagnetic films / M.V.Sapozhnikov, S.A.Gusev, B.B.Troitskii, L.V.Khokhlova. // *Optics Letters* - 2011. - V.36. - P.4197-4199.
- A16. Sapozhnikov, M.V. Frustrated magnetic vortices in hexagonal lattice of magnetic nanocaps / M.V.Sapozhnikov, O.L.Ermolaeva, B.G.Gribkov, I.M.Nefedov, I.R.Karetnikova, S.A.Gusev, V.V.Rogov, B.B.Troitskii, and L.V.Khokhlova. // *Phys.Rev. B* - 2012. - V.85. - P.054402-1-054402-6.
- A17. Udalov, O. G. Nonreciprocal light diffraction by a lattice of magnetic vortices / O. G. Udalov, M. V. Sapozhnikov, E. A. Karashtin, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, E. V. Skorohodov, V. V. Rogov, A. Yu. Klimov, A. A. Fraerman. // *Phys.Rev. B* - 2012. - V.86. - P. 094416-1-094416-4.
- A18. Demortière, Arnaud. Self-Assembled Tunable Networks of Sticky Colloidal Particles / Arnaud Demortière, Alexey Snezhko, Maksim V. Sapozhnikov, Nicholas



Becker, Thomas Proslie and Igor S. Aranson. // Nature Communications - 2014. - V.5. - Article number:3117. - P.1-7

A19. Sapozhnikov, M.V. Two-dimensional skyrmion lattice in a nanopatterned magnetic film / M.V.Sapozhnikov and O.L.Ermolaeva. // Phys. Rev. B - 2015. - V.91. - P.024418-1-024418-6.

A20. Kolmychek, I.A., First and second order in magnetization effects in optical second-harmonic generation from a trilayer magnetic structure /. I.A.Kolmychek, V.L.Krutyanskiy, T.V.Murzina, M.V.Sapozhnikov, E.A.Karashtin, V.V.Rogov, and A.A.Fraerman. // JOSA B - 2015. - V.32. - P.331-338.

A21. Kolmychek, Irina A. Optical Second Harmonic Generation In Nanostructures With Inhomogeneous Magnetization / Irina A. Kolmychek, Victor L. Krutyanskiy, Tatiana Murzina, Evgeniy A. Karashtin, Maxim V. Sapozhnikov, and Andrey A. Fraerman // Solid State Phenomena - 2015. - V.233-234. - P.595-598.

A22. Sapozhnikov, M.V. Skyrmion lattice in a magnetic film with spatially modulated material parameters / M.V.Sapozhnikov. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2015. - V.396. - P.338-344.

A23. Gusev, S.A. The modification of the structure of multilayer Co/Pt films by the irradiation with a focused helium ion beam / S.A.Gusev, M.N.Drozov, O.L.Ermolaeva, A.A.Fraerman, N.S.Gusev, V.Yu.Mikhailovskii, Yu.V.Petrov, M.V.Sapozhnikov, and S.N.Vdovichev. // AIP Conference Proceedings - 2016. - V.1748. - P.030002-1-030002-7.

A24. Sapozhnikov, M.V. Artificial dense lattice of magnetic bubbles / M.V.Sapozhnikov, S.N.Vdovichev, O.L.Ermolaeva, N.S.Gusev, A.A.Fraerman, S.A.Gusev, and Yu.V.Petrov. // Appl. Phys. Lett. -2016. - V.109. - P.042406

A25. Ermolaeva, O. L. Magnetic Force Microscopy of Nanostructured Co/Pt Multilayer Films with Perpendicular Magnetization / O. L. Ermolaeva, N. S. Gusev, E. V. Skorohodov, Yu. V. Petrov, M. V. Sapozhnikov and V. L. Mironov // Materials - 2017. - V.10, - P.1034

A26. Sapozhnikov M.V., Spin-wave resonances of ferromagnetic films with spatially modulated anisotropy / M.V. Sapozhnikov, R.V. Gorev, E.A. Karashtin, V.L. Mironov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2018. - V. 446 - P. 1

A27. Sapozhnikov M.V., Ferromagnetic resonance of 2D array of magnetic nanocaps / M.V. Sapozhnikov, L.I. Budarin, E.S. Demidov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2018. - V. 449 - P. 68

A28. Сапожников М.В., Магнитные скирмионы в пленках с модулированной толщиной / М.В. Сапожников, О.В. Ермолаева, Е.В. Скороходов, Н.С. Гусев, М.Н. Дроздов // Письма в ЖЭТФ - 2018 - Т. 107 - С. 378

#### Список цитируемой литературы

1. В.М. Розенбаум, Колебательные и ориентационные состояния поверхностных групп атомов. / В.М. Розенбаум, В.М. Огенько, А.А. Чуйко // УФН - 1991 - Т.161 - С.79.

2. A.A. Fraerman, Metastable and nonuniform states in 2D orthorhombic dipole system / A.A. Fraerman, M.V. Sapozhnikov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 1999 - V.192 - P.191.

3. К. Р. Мухаматчин, Неколлинеарные состояния в цепочке однодоменных магнитных частиц / К. Р. Мухаматчин, А. А. Фраерман // Письма ЖЭТФ - 2011 - Т.93 - С.797-800.

4. Т.О'Делл, Ферромагнитодинамика // Москва, Мир 1983

5. N. Nagaosa, Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions / N. Nagaosa and Y. Tokura // Nat. Nanotech. - 2013 - V.8 - P.899.

6. S. Muhlbauer, Skyrmion Lattice in a Chiral Magnet / S. Muhlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, P. Boni // Science - 2009 - V.323 - P.915.

7. Y. Onose, Doping dependence of transport properties in  $Fe_{1-x}Co_xSi$  / Y. Onose, N. Takeshita, C. Terakura, H. Takagi, and Y. Tokura // Phys. Rev. B - 2005 - V.72 P.224431.

8. T. Schulz, Emergent electrodynamics of skyrmions in a chiral magnet / T. Schulz, R. Ritz, A. Bauer, M. Halder, M. Wagner, C. Franz, C. Pfleiderer, K. Everschor, M. Garst & A. Rosch // Nature Physics - 2012 - V.8 - P.301.

9. R. Streubel, Magnetism in curved geometries / R. Streube, P. Fischer, F. Kronast, V.P. Kravchuk, D.D. Sheka, Y. Gaididei, O.G. Schmidt, D. Makarov // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2016 - V.49 - 363001.

10. M. Albrecht, Magnetic multilayers on nanospheres / M. Albrecht, G. Hu, I. L. Guhr, T. C. Ulbrich, J. Boneberg, P. Leiderer, G. Schatz // Nat. Mater. - 2005 - V.4 - P.203.

11. J. K. nee Moser, Magnetoresistive effects in Co/Pd multilayers on self-assembled nanoparticles / J. K. nee Moser, V. Kunej, H.-F. Pernau, E. Scheer, and M. Albrecht // J. Appl. Phys. - 2010 - V.107 - P.09C506.

12. Z. Liu, Magneto-optical Kerr effect in perpendicularly magnetized Co/Pt films on two-dimensional colloidal crystals / Z. Liu, L. Shi, Z. Shi, X. H. Liu, J. Zi, S. M. Zhou, S. J. Wei, J. Li, X. Zhang, Y. J. Xia // Appl. Phys. Lett. - 2009 - V.95 - P.032502.

13. V.M.Dubovik, Toroid moments in electrodynamics and solid-state physics / V.M.Dubovik V.V.Tugushev // Physics Reports - 1990 - V. 187 - P. 145-202.

14. А.П. Протогенов, Узлы и зацепления распределений параметров порядка в сильно коррелированных системах / А.П. Протогенов // УФН - 2006 - Т.176 - С.689.

15. W. F. Brown Jr., Possibility of Visual Observation of Antiferromagnetic Domains / W. F. Brown Jr., S. Shtrikman, and D. Treves // Journal of Applied Physics - 1963 - V.34, - P.1233.

16. B. B. Krichevstov, Magnetospatial dispersion effect in magnetic semiconductors  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  / B. B. Krichevstov, R. V. Pisarev, A. A. Rzhovsky, and V. N. Gridnev // Phys. Rev. B - 1998 - V.57 - P.12611
17. J. Sklenar, Ferromagnetic resonance in a topographically modulated permalloy film / J. Sklenar, P. Tucciarone, R. J. Lee, D. Tice, R. P. H. Chang, S. J. Lee, I. P. Nevirkovets, O. Heinonen, and J. B. Ketterson // Phys. Rev. B - 2015 - V.91 - P.134424
18. K.Y. Guslienko, Magnetic skyrmion low frequency dynamics in thin circular dots / K.Y. Guslienko, Z.V. Gareeva // J. Magn. Magn. Mat. - 2017 - V.422 - P.176
19. И.С. Арансон, Активные коллоиды / И.С. Арансон // УФН - 2013 - Т.183 - С.87
20. I.S. Aranson, Electrostatically Driven Granular Media: Phase Transitions and Coarsening / I.S. Aranson, D. Blair, V.A. Kalatsky, G.W. Crabtree, W.-K. Kwok, V.M. Vinokur, and U. Welp // Phys. Rev. Lett. - 2000 - V.84 - P.3306.
21. I.S. Aranson, Phase separation and coarsening in electrostatically driven granular media / I.S. Aranson, B. Meerson, P.V. Sasorov, V.M. Vinokur // Phys. Rev. Lett. - 2002 - V.88 - P.204301.
22. Syun-Ru Yeh, Assembly of ordered colloidal aggregates by electric-field-induced fluid flow / Syun-Ru Yeh, Michael Seul, Boris I. Shraiman // Nature - 1997 - V.386 - P.57-59
23. Solomentsev, Y., Particle clustering and pattern formation during electrophoretic deposition: A hydrodynamic model / Solomentsev, Y., Böhmer, M., Anderson, J.L. // Langmuir - 1997 - V.13 - P.6058.
24. J.S. Jacobs An Approach to Elongated Fine-Particle Magnets / J.S. Jacobs, C.P. Bean // Phys. Rev. - 1955 - V.100 - P.1060.
25. С.А.Гусев, Коллективные эффекты в искусственных двумерных решетках ферромагнитных наночастиц / С.А.Гусев, Ю.Н.Ноздрин, М.В.Сапожников, А.А.Фраерман // УФН - 2000 - Т.170 - С.331.
26. M.J. Donahue, D.G. Porter, OOMMF User's Guide Version 1.0 / M.J. Donahue // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999.
27. S.V. Nedukh, Standing spin waves in perpendicularly magnetized circular dots at millimeter waves / S.V. Nedukh, S.I. Tarapov, D.P. Belozorov, A.A. Kharchenko, V.O. Golub, I.V. Kilimchuk, O.Y. Salyuk, E.V. Tartakovskaya, S.A. Bunyaev, G.N. Kakazei // J. Appl. Phys. - 2013 - V.113 - P.17B521

Сапожников Максим Викторович

## ЭФФЕКТЫ МАГНИТО- И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОЛЛЕКТИВНОМ ПОВЕДЕНИИ МИКРО И НАНОСИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Подписано к печати 29.06.2018 г.  
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН — филиала  
Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»  
603087, Нижегородская область, Кстовский район,  
д. Афонино, ул. Академическая, д.7.