

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа М.В. Сапожникова посвящена исследованию дальнедействующих взаимодействий в системах микро- и нанообъектов: магнитостатического взаимодействия в магнитных наноструктурах и системах магнитных наночастиц, электростатического взаимодействия в коллоидных системах.

Исследование дальнедействующих взаимодействий необходимо для формирования упорядоченных микро- и наноструктур, управления коллективным поведением нано и микросистем, получения материалов с новыми свойствами. Для разрабатываемых твердотельных магнитных систем обработки и хранения информации нового поколения представляют большой интерес доменные границы и скирмионы, свойства которых во многом определяются дальнедействующим магнитостатическим взаимодействием. Решетки магнитных вихрей и скирмионов могут обладать не только топологическим зарядом, но и иметь тороидный момент в распределении намагниченности, следствием чего, в свою очередь, могут быть невзаимные эффекты при распространении электромагнитных волн.

Гранулярные материалы и коллоидные системы широко используются как в традиционной фармакологии, так и в современных медико-биологических технологиях, в пищевой и строительной индустрии, в микроэлектронике. В таких системах при нахождении вдали от равновесия и при внешнем воздействии возможна самоорганизация в сложные динамические структуры, управляемая перестройка коллоидных кристаллов. Изучение подобного рода динамических неравновесных явлений во многом находится на ранней стадии. Таким образом, тема диссертационной работы М.В. Сапожникова, несомненно, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 226 страницах, включает 110 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, изложены цели и задач работы, методы исследования, показана ее научная новизна и значимость. Приведены положения, выносимые на защиту, данные об апробации и публикации результатов работы, подробные сведения о личном вкладе автора в получение результатов диссертации.

В первой главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований поведения систем однодоменных магнитных наночастиц, рассматриваемых в качестве классических диполей. Методами микромагнитного моделирования решена задача о термоактивационном перемагничивании цепочки магнитостатически взаимодействующих наночастиц. Показано, что кривая намагничивания в этом случае имеет фрактальный характер в виде так называемой канторовой (чёртовой) лестницы. Если критерий однодоменности не выполняется, намагниченность наночастицы может иметь различные метастабильные конфигурации, в том числе и вихревую. Автором решена задача о влиянии межчастичного магнитостатического взаимодействия в цепочке частиц на конфигурацию намагниченности внутри отдельной магнитной частицы, проведена экспериментальная проверка модели.

Во второй главе исследована возможность стабилизации магнитных скирмионов в пленках с перпендикулярной анизотропией на основе традиционных ферромагнитных металлов (CoPt, FePt, FePd), где отсутствует взаимодействие Дзялошинского – Мориа, с помощью локальной модификации параметров магнитной пленки (толщины, анизотропии). Автором теоретически предложены и обоснованы, а затем экспериментально реализованы методы наноструктурирования магнитных пленок для стабилизации скирмионов. Показано, что диаметр стабильного магнитного скирмиона в этом случае может достигать 50-100 нм, что сравнимо с размерами скирмионов в хиральных магнитных материалах. Подтверждено, что решетки магнитных скирмионов могут зарождаться в таких структурах в процессе перемагничивания в однородном поле. При этом, что очень важно, скирмионы остаются устойчивыми при комнатной температуре и в отсутствие внешнего магнитного поля.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию магнитных наноструктур, полученных напылением магнитной пленки на поверхность коллоидного кристалла в виде плотно упакованной гексагональной решетки сферических частиц диаметром 120-410 нм. Сильно

развитая неровность поверхности магнитной пленки приводит к возникновению полей рассеяния и усиливает вклад дальнедействующего магнитостатического взаимодействия в энергию системы. В зависимости от геометрических параметров системы изменяется соотношение между обменной и магнитостатической энергией системы, в результате намагниченность полусферических частиц может быть либо в квазиоднородном состоянии, либо формировать магнитный вихрь. В спектрах отражения и спектрах магнитооптического вращения пленок кобальта на поверхности коллоидного кристалла обнаружено два резонанса, отсутствующих в спектрах плоских пленок. На основе анализа зависимости положения резонансов от периода наноструктуры, угла падения, длины волны и поляризации света сделан вывод о возбуждении поверхностных плазмонов.

Четвёртая глава посвящена исследованию магнитных наноструктур с тороидным моментом в распределении намагниченности. Такими свойствами обладают рассмотренные в предыдущих главах диссертации нетривиальные магнитные конфигурации – магнитные скирмионы, магнитные вихри в магнитных нанополусферах и наночастицах. Проведено экспериментальное и численное исследование спектров и мод ферромагнитного резонанса в магнитных пленках Co и NiFe на поверхности коллоидного кристалла. Обнаружено возбуждение большого числа резонансных мод, отсутствующих в спектре плоских магнитных пленок той же толщины; в отличие от стоячих радиально симметричных мод резонанса в плоских дисках, в нанополусферах они имеют спиральную структуру и демонстрируют прецессию. Обнаружена невзаимность в прецессии резонансных мод. Аналогичная невзаимность, приводящая к расщеплению соответствующих резонансных мод, прецессирующих против/по часовой стрелке по частоте, обнаружена при численном моделировании ФМР в решетках магнитных скирмионов. Экспериментально исследованы невзаимные эффекты при дифракции света на двумерных решетках магнитных наночастиц с вихревым распределением намагниченности.

В пятой главе исследованы динамические структуры и процессы самоорганизации в системах электростатически взаимодействующих микрочастиц – суспензиях и коллоидных растворах металлических и полимерных частиц в слабопроводящей жидкости. Обнаружено формирование статических преципитатов, образованных неподвижными частицами, и различных динамических структур в результате согласованного

движения большого количества частиц. Построена теория, успешно описывающая формирование экспериментально наблюдавшихся статических и динамических структур. При экспериментальном исследовании поведения 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.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Достоверность полученных в работе результатов основывается на проведении экспериментальных исследований на современном оборудовании для изготовления, литографирования и исследования оптических, магнитооптических, транспортных свойств тонких пленок, использования при моделировании известных пакетов программ.

Представленные в диссертации результаты исследования и основные положения, выносимые на защиту, обладают **научной новизной**. Выделим:

- теоретически предложенные и обоснованные, а также экспериментально реализованные методы наноструктурирования магнитных пленок для стабилизации скирмионов при комнатной температуре и в отсутствие внешнего магнитного поля (что имеет и **практическую значимость**);

- обнаружение возбуждения поверхностных плазмонов в магнитных пленках с сильно развитой неровностью поверхности;

- исследование магнитных наноструктур с тороидным моментом в распределении намагниченности и возникновение невзаимных эффектов при распространении электромагнитных волн в таких структурах;

- экспериментальное обнаружение, исследование и построение теории процессов самоорганизации статических и динамических крупномасштабных структур в коллоидных системах микрочастиц в слабопроводящей жидкости.

Диссертация М.В. Сапожникова посвящена теоретическому и экспериментальному изучению физической природы микро- и наноструктур, исследованию изменения их физических свойств при различных внешних воздействиях. Это обеспечивает соответствие диссертации **специальности 01.04.07**.

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. Автор называет так называемые «мягкие» (не содержащие линий Блоха в доменной границе) цилиндрические магнитные домены скирмионами. Согласно устоявшейся терминологии, «мягкие» цилиндрические магнитные домены правильнее называть именно доменами, с уточнением, что топологически они эквивалентны скирмионам.

2. При численном моделировании магнитных состояний и петель намагничивания наноструктур, полученных напылением магнитной пленки на поверхность коллоидного кристалла, принято, что они имеют форму полусфер. В то же время реальная форма таких наноструктур зависит от условий напыления и может значительно отличаться от полусферы.

3. Автор считает наблюдавшиеся им стабильные магнитные скирмионы диаметром 50-100 нм сравнимыми с размерами скирмионов в хиральных магнитных материалах. Отметим, что в литературе имеются данные о стабильности хиральных скирмионов диаметром в единицы нанометров, причем без локальной модификации параметров магнитной пленки.

4. В диссертации выделяется глава 5, посвященная динамическим структурам и процессам самоорганизации в микросистемах. В качестве объекта исследований выбраны системы электростатически взаимодействующих металлических и полимерных микрочастиц. В целом это показывает широкий круг интересов автора. Тем не менее, для обеспечения цельности диссертационного исследования следовало бы провести аналогии, показать взаимосвязи или отличия изученных явлений с известными процессами самоорганизации в магнитных пленках.

5. В диссертации и автореферате имеются орфографические неточности.

Указанные замечания не снижают ценности полученных в диссертации результатов. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком уровне. Положения, выносимые на защиту, и основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, прошли апробацию на многих российских и международных конференциях. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение

Диссертационная работа М.В. Сапожникова «Эффекты магнито- и электростатического взаимодействия в коллективном поведении микро и наносистем» является научно-квалификационной работой, в которой

