

На правах рукописи

Ермолаева Ольга Леонидовна

**МАГНИТНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ
НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ СОСТОЯНИЙ В
ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте физики микроструктур Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИФМ РАН,
Миронов Виктор Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией
Бухараев Анастас Ахметович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Казанский физико-
технический институт им. Е.К.Завойского
КазНЦ РАН

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ИФМ РАН
Токман Иосиф Давидович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
технологии микроэлектроники и
особочистых материалов РАН
(г. Черноголовка)

Защита состоится “28” февраля 2013 г. в 14.00 час.
на заседании диссертационного совета Д 002.098.01
в Институте физики микроструктур РАН
по адресу 603950, Нижний Новгород, ГСП-105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан “___” _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

К.П.Гайкович

Актуальность темы

Исследование свойств ферромагнитных наноструктур представляет интерес, обусловленный широкими возможностями их применения в современных приборах микроэлектроники. Такие структуры используются в качестве среды для записи информации, источников неоднородного магнитного поля, датчиков магнитного поля, а так же для разработки элементов магнитных логических устройств. Одним из наиболее информативных и широко распространенных методов исследования распределения намагниченности субмикронных объектов является магнитно-силовая микроскопия. Данная диссертационная работа посвящена развитию методов магнитно-силовой микроскопии и их применению в исследованиях неоднородных состояний в искусственно созданных ферромагнитных наноструктурах.

В работе рассмотрены основные особенности метода магнитно-силовой микроскопии и решен ряд методологических проблем:

- изучено влияние зонда магнитно-силового микроскопа (МСМ) на структуру намагниченности образцов;
- исследовано влияние размера и формы зондов МСМ на величину амплитуды фазового контраста от малых ферромагнитных нанобъектов;
- разработаны методики контролируемого селективного изменения магнитного состояния ряда нанобъектов при помощи поля зонда МСМ.

Методы магнитно-силовой микроскопии были применены для исследования широкого круга ферромагнитных структур, представляющих собой интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения:

- были проведены исследования магнитных состояний в частицах крестообразной формы и разработаны методики формирования в них необычного распределения намагниченности, получившего в литературе название магнитного антивихря. Структуры с антивихревым распределением представляют интерес в связи их необычными транспортными свойствами, а так же в связи с возможностями их использования в логических схемах [1-3];
- исследованы эффекты пиннинга доменной стенки локальным магнитным полем в ферромагнитной системе, представляющей собой нанопроволоку и две частицы. Подобные системы представляют собой интерес в связи с перспективами создания на их основе приборов магнитной логики;
- изучены особенности перемагничивания плотноупакованного массива ферромагнитных анизотропных однодоменных частиц, упорядоченных на решетке с гексагональной симметрией. Такие массивы перспективны для создания пассивных перестраиваемых фильтров СВЧ диапазона.

Актуальность представленной работы обусловлена важностью изучаемых объектов, а так же перспективностью методов, развиваемых для их исследования.

Степень разработанности темы исследования

Магнитно-силовая микроскопия является мощным методом исследования и модификации магнитных состояний ферромагнитных структур, который появился в арсенале исследователей не многим более 20 лет назад. За это время были проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования магнитных состояний различных искусственно созданных ферромагнитных нанобъектов. Однако ряд интересных с практической и фундаментальной точки зрения структур был не изучен или недостаточно изучен на момент начала диссертационных исследований.

Одной из методологических проблем магнитно-силовой микроскопии является проблема влияния поля зонда на структуру намагниченности исследуемых объектов. На практике это приводит к некоторым специфическим искажениям МСМ изображений. Несмотря на то, что авторами ряда работ [4, 5] обсуждалось подобное воздействие зонда на намагниченность образца, систематического анализа причин искажений МСМ изображений не проводилось.

В ряде исследований большое внимание уделяется проблемам создания с помощью наноструктур распределений намагниченности сильно неоднородных на наномасштабах [6-8]. В частности, большой интерес с фундаментальной и практической точки зрения вызывает магнитный антивихрь. Однако практическая реализация такого распределения затруднена, поскольку спонтанное зарождение антивихря в нанобъекте маловероятно. В работах [6, 7] антивихрь наблюдался только как часть более сложных распределений намагниченности. К моменту начала диссертационных исследований в литературе не сообщалось о каких-либо структурах, оптимизированных с точки зрения реализации антивихревого распределения, и каких-либо методиках его контролируемого формирования.

В последние 10 лет наблюдается повышенный интерес к явлениям, связанным с движением доменных стенок в ферромагнитных нанопроволоках под действием внешних магнитных полей. Главным образом это обусловлено попытками создания на основе таких систем элементов магнитной логики. Одним из главных условий функционирования таких устройств является реализация управляемого пиннинга доменной стенки. В ряде работ [8, 9] были исследованы различные варианты пиннинга, связанного с взаимодействием доменной стенки с искусственными дефектами формы нанопроволоки или с локальными магнитными полями, создаваемыми ферромагнитными наночастицами. Однако каких-либо систем, реализующих управляемый пиннинг-депиннинг доменных стенок, в литературе не упоминалось.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось развитие методик магнитно-силовой микроскопии и их применение для исследований неоднородных распределений намагниченности в ферромагнитных субмикронных структурах.

Основными задачами данной работы являлись:

- Исследование причин возникновения искажений на магнитно-силовых изображениях в виде неравной интенсивности минимумов и максимумов распределения контраста.
- Разработка методики формирования антивихревого состояния в ферромагнитных частицах крестообразной формы.
- Изучение особенностей формирования МСМ контраста от ферромагнитной наноффрированной пленки.
- Исследование эффектов пиннинга доменной стенки в ферромагнитной нанопроволоке локальным магнитным полем наночастиц.

Научная новизна

1. Проведен анализ факторов, приводящих к искажениям МСМ изображений, проявляющихся в виде различной интенсивности минимумов и максимумов МСМ контраста, и показано, что основной причиной их возникновения является возмущение намагниченности образца вертикальной компонентой поля зонда МСМ.
2. Впервые было экспериментально реализовано антивихревое магнитное состояние в ферромагнитных частицах крестообразной формы.
3. Исследованы особенности распределения намагниченности в ферромагнитной пленке, нанесенной на слой сферических частиц ПММА (полиметилметакрилат). Показано, что два типа экспериментально регистрируемых МСМ изображений от такой структуры соответствуют квазиоднородному – меридиональному и вихревому распределению намагниченности в полусферах.
4. Предсказан и экспериментально зарегистрирован эффект управляемого пиннинга доменной стенки в системе ферромагнитная нанопроволока – ферромагнитные наночастицы, обусловленный взаимодействием доменной стенки с полями рассеяния наночастиц.

Практическая значимость

1. Разработаны две экспериментальные методики, позволяющие формировать антивихревое состояние в ферромагнитных частицах крестообразной формы. Первая методика основана на перемагничивании асимметричных

крестообразных частиц в однородном внешнем поле; вторая - на несимметричном воздействии зонда магнитно-силового микроскопа на распределение намагниченности в симметричной частице.

2. Экспериментально реализована ферромагнитная система, представляющая собой нанопроволоку и две частицы, в которой наблюдался контролируемый пиннинг доменной стенки за счет локального магнитного поля частиц. На основе этой системы предложен прототип магнитной логической ячейки, реализующей функцию «Исключающее ИЛИ».

Методы и методология исследования

Исследуемые ферромагнитные структуры изготавливались методами электронной литографии, что позволяло с высокой степенью точности контролировать их размеры и форму. Структура намагниченности образцов исследовалась методом магнитно-силовой микроскопии. При анализе и интерпретации МСМ изображений от магнитных распределений применялся метод микромагнитного моделирования, основанный на численном поиске квазистационарного распределения направлений локальных магнитных моментов, соответствующего минимуму свободной энергии системы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Искажения магнитно-силовых изображений в виде неравной интенсивности минимумов и максимумов распределения контраста обусловлены возмущением распределения намагниченности образца под действием перпендикулярной компоненты поля зонда магнитно-силового микроскопа.
2. Антивихревое магнитное состояние в ферромагнитных частицах крестообразной формы может быть сформировано либо путем перемагничивания асимметричной частицы в однородном внешнем поле, либо при воздействии поля зонда магнитно-силового микроскопа на симметричную частицу.
3. Экспериментально зарегистрированные распределения МСМ контраста от гофрированной ферромагнитной пленки, нанесенной на слой сферических наночастиц, соответствуют квазиоднородному – меридиональному и вихревому состояниям намагниченности в магнитных полусферах.
4. В ферромагнитной системе, состоящей из нанопроволоки и двух наночастиц, реализуется управляемый пиннинг доменной стенки, обусловленный взаимодействием намагниченности нанопроволоки с полями рассеяния наночастиц.

Степень достоверности и апробация результатов

Работа выполнена на современном уровне научных исследований. Научные положения и результаты диссертации достаточно аргументированы и обоснованы сопоставлением с имеющимися в литературе данными, использованием дополняющих друг друга подходов, сравнением с результатами теоретических расчетов. Полученные результаты соответствуют мировому уровню, опубликованы в реферируемых журналах. Результаты диссертационной работы докладывались на 16 российских и международных конференциях. В их число входят:

- X, XI, XIII, XIV, XV, XVI Международные симпозиумы "Нанофизика и наноэлектроника", (Н.Новгород, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.).
- XV, XVII, XVIII Российские симпозиумы по электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2007, 2011, 2012 гг.).
- XXI международная конференция "Новое в магнетизме и магнитных материалах" (Москва 28 мая – 4 июня 2009 г.).
- International conference on nanoscale magnetism (ICNM-2010), (Gebze, Turkey, September 28 –October 2, 2010.).
- IX международная конференция "Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии" "БелСЗМ-2010" (Беларусь, Минск, 12-15 октября 2010, г.).
- IV Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" Nanospintronics (Ekaterinburg, Russia, June 28-July 2, 2010.).
- International symposium "Nano and Giga challenges in electronics, photonics and renewable energy" ("NGC 2011"), (Moscow, Russia, September 12-16, 2011.).
- International Conference "Functional Materials" ("ICFM - 2011"), (Ukraine, Crimea, Partenit, October 3 – 8, 2011.).
- International conference "Micro- and Nanoelectronics-2012" (Zvenigorod, Russia, October 1-5, 2012.).

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы основные цели и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 представляет собой обзор литературы по основным вопросам, рассмотренным в диссертации. Приведен обзор работ по магнитно-силовой микроскопии, в частности, рассмотрена проблема влияния поля зонда магнитно-силового микроскопа на распределение намагниченности в исследуемых объектах. Представлены работы, посвященные исследованиям неоднородных распределений намагниченности в ферромагнитных субмикронных частицах.

Рассмотрен ряд работ, в которых теоретически и экспериментально изучалось антивихревое магнитное состояние. Проанализированы проведенные различными авторами исследования движения и пиннинга доменных стенок в ферромагнитных нанопроволоках. Проведен обзор работ по исследованиям искусственно созданных геометрически фрустрированных ферромагнитных систем.

Глава 2 посвящена исследованиям влияния поля зонда магнитно-силового микроскопа на намагниченность исследуемого образца.

Раздел 2.1 данной главы посвящен рассмотрению структуры полей рассеяния различных зондов. Проведены сравнения интенсивности и пространственной структуры полей зондов параболической и сферической формы. Результаты исследований показали, что для большинства задач можно подобрать такие параметры модельного сферического зонда, при которых создаваемое им поле является приемлемой аппроксимацией поля параболического зонда. При этом математические выражения, описывающие поле сферического зонда, имеют более простой вид и более удобны при проведении расчетов и микромагнитного моделирования.

В **разделе 2.2** проанализированы основные факторы, приводящие к искажению магнитно-силовых изображений в виде неравной интенсивности максимумом и минимумов МСМ контраста. Проведены теоретические исследования влияния слабого поля зонда МСМ на распределение намагниченности в тонких ферромагнитных образцах. Проведено сравнение теоретически рассчитанной величины возмущения распределения намагниченности с результатами, полученными на основе численного моделирования.

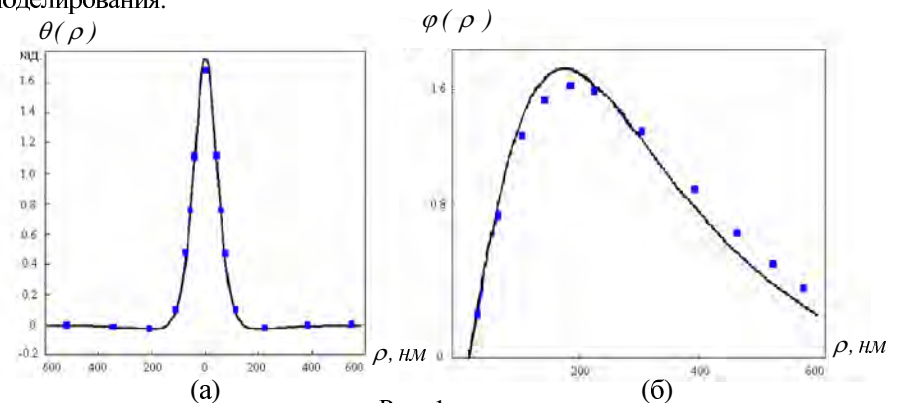


Рис. 1.

Микромагнитное моделирование и расчеты проводились для эллиптической частицы Co, малая и большая оси которой составляли 600 нм и 1200 нм соответственно, а толщина 5 нм. Зонд представлял собой однородно намагниченный шар Co диаметром 50 нм. Расстояние от кончика зонда до

поверхности частицы составляло 100 нм. На рис. 1 приведены центральные поперечные сечения пространственного распределения величин полярного [рис. 1(а)] и азимутального [рис. 1(б)] углов, характеризующих отклонение намагниченности от невозмущенного состояния.

Как видно из рис. 1, наблюдается достаточно хорошее совпадение теоретических зависимостей (сплошная линия на графиках) и зависимостей, полученных в результате численного моделирования (точки на графиках), что свидетельствует о том, что теоретические оценки хорошо описывают реальное перераспределение намагниченности в поле зонда МСМ.

На основе найденного возмущенного распределения намагниченности рассчитаны величины дополнительного вклада в МСМ контраст $\Delta\phi_\theta$ и $\Delta\phi_\varphi$, обусловленного локальным подмагничиванием образца вертикальной компонентой поля сферического зонда:

$$\Delta\phi_\theta = \frac{57\pi V_l^2 M_{st}^3}{8M_s l_{ex}^2 h^4},$$

и компонентой, поля в плоскости образца:

$$\Delta\phi_\varphi = \frac{15M_{st}^3 M_s V_l^2}{h^6 k},$$

где M_s и M_{st} намагниченность в насыщении образца и зонда соответственно, V_l – объем зонда, l_{ex} – обменная длина материала образца, k – константа анизотропии образца, h – высота прохода зонда.

Было показано, что для характерных параметров исследуемых образцов справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta\phi_\theta}{\Delta\phi_\varphi} \approx 1.5 \frac{kh^2}{M_s^2 l_{ex}^2} \gg 1.$$

То есть, основной причиной искажения МСМ изображений является возмущение намагниченности образца вертикальной компонентой поля зонда МСМ.

В разделе 2.3 приведены результаты исследований особенностей поведения магнитного вихря в поле зонда магнитно-силового микроскопа. Рассмотрено индуцированное зондом смещение вихря в ферромагнитной частице в форме круглого диска. Представлены результаты теоретических оценок энергии взаимодействия намагниченности частицы с полем зонда МСМ в рамках модели жесткого магнитного вихря. Воздействие поля зонда МСМ на магнитную структуру вихря в рамках данной модели можно рассматривать как воздействие на оболочку и на кор вихря. Воздействие на намагниченность оболочки вихря приводит к его смещению перпендикулярно линии, соединяющий зонд и центр

частицы. Воздействие на кор вихря определяется взаимной ориентацией намагниченности кора и зонда и приводит либо к притяжению вихря к зонду либо к отталкиванию. Приведены результаты микромагнитного моделирования индуцированных зондом процессов изменения магнитного состояния круглого диска. Продемонстрированы возможность индуцированного зондом перемагничивания круглой частицы из вихревого состояние в однородное и возможность изменения направления намагниченности кора вихря под действием поля зонда.

В разделе 2.4 представлены результаты исследований индуцированного зондом перемагничивания частиц, обладающих анизотропией типа легкая ось (ось анизотропии направлена перпендикулярно поверхности образца). Упорядоченные массивы частиц с перпендикулярной анизотропией, на данный момент являются одной из перспективных сред для записи информации [10, 11]. Большинство работ посвящено изучению процессов перемагничивания упорядоченных массивов частиц в однородных магнитных полях. Нами были рассмотрены особенности процессов селективного перемагничивания таких частиц с различными латеральными размерами неоднородным полем зонда магнитно-силового микроскопа. Было продемонстрировано, что методика, необходимая для индуцированного зондом перемагничивания, зависит от латеральных размеров частиц. Микромагнитное моделирование особенностей процессов перемагничивания частиц малого (35 нм) и большого (200 нм) диаметра под действием поля зонда показало, что в случае, когда диаметр частицы меньше характерного размера области спадания поля зонда, перемагничивание происходит при опускании зонда в центр частицы, а если размеры частиц превышают характерный размер области спадания поля зонда, то для перемагничивания необходимо сканирование ее поверхности зондом на малой высоте.

Раздел 2.5 посвящен исследованиям возможностей записи информации на массивах малых сферических магнитных наночастиц зондом МСМ. При исследовании частиц, размеры которых составляют несколько десятков нанометров, встает задача выбора оптимальных геометрических параметров зондов МСМ. Были проведены исследования зависимости амплитуды МСМ контраста в зависимости от геометрических размеров и формы зондов. Рассмотрены зонды различной формы (сферический, цилиндрический, параболический) и показано, что для каждого типа зонда существует оптимальный размер, определяемый размерами исследуемого объекта, при котором амплитуда МСМ контраста максимальна.

Глава 3 диссертации посвящена исследованию частиц сложной геометрической формы, приводящей к формированию в них существенно неоднородных распределений намагниченности.

Раздел 3.1 посвящен исследованиям особенностей распределения намагниченности в частицах крестообразной формы. Были исследованы

возможные магнитные состояния таких частиц в зависимости от их геометрических параметров. Показано, что в зависимости от аспектного соотношения (отношения ширины сегмента креста к латеральному размеру частицы) основным состоянием может быть либо квазиоднородное магнитное состояние (при отношении ширины сегмента креста к длине $<1/2$) либо вихревое (при отношении ширины сегмента креста к длине $>1/2$). Продемонстрирована возможность существования в частицах с аспектным соотношением $<1/2$ антивихревого распределения намагниченности. Разработаны две методики, позволяющие стабильно формировать уединенное антивихревое распределение намагниченности в крестообразных частицах. Первая методика основана на перемагничивании во внешнем однородном поле ассиметричных крестообразных частиц, с различной коэрцитивностью сегментов. Различие достигалось за счет формирования на концах двух сегментов утолщений, понижающих их коэрцитивность.



Рис. 2.

Экспериментально методика перемагничивания была опробована на массиве крестообразных частиц Co, с латеральными размерами 1 мкм, шириной сегмента 100 нм, размером утолщения 150 нм и толщиной 40 нм. На рис. 2 приведено СЭМ изображение участка массива крестообразных частиц.

На рис. 3 представлены MCM изображения участка массива частиц в квазиоднородном состоянии до перемагничивания [рис. 3(а)] и в антивихревом состоянии после перемагничивания [рис. 3(б)].

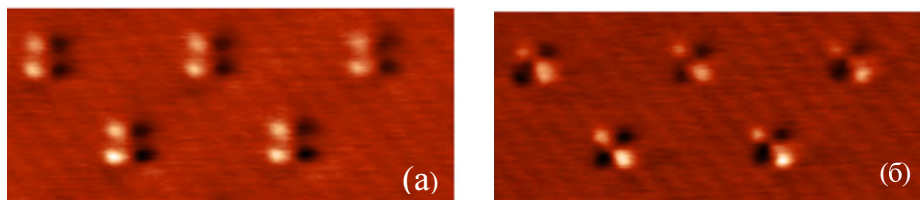


Рис. 3.

Вторая методика основана на перемагничивании отдельных сегментов крестообразных частиц полем зонда магнитно-силового микроскопа. Формирование антивихревого состояния происходило в два этапа, за счет последовательного изменения состояния в сегментах креста. Экспериментально методика перемагничивания была реализована в массиве симметричных

крестообразных частиц Co с латеральными размерами 1 мкм, шириной сегмента 100 нм и толщиной 40 нм.

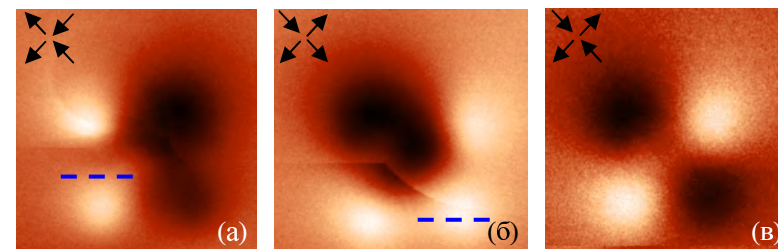


Рис. 4.

На рис. 4 приведены MCM изображения последовательных стадий перемагничивания крестообразной частицы, а так же схематическое изображение распределения намагниченности. Индуцированное полем зонда перемагничивание частицы происходило из квазиоднородного состояния А-типа (рис. 4(а)) в квази-однородное состояние Б-типа (рис. 4(б)), при помощи сканирования зондом на малой высоте над одним из сегментов креста (примерная траектория движения зонда при перемагничивании показана пунктирной линией). Затем повторным сканированием над другим сегментом частица переводилось в антивихревое состояние [рис. 4(б)].

В разделе 3.2 приведены результаты исследований магнитных состояний в ферромагнитной пленке Co, нанесенной на слой круглых частиц ПММА. Изучены особенности формирования MCM контраста от такого объекта. Проведены экспериментальные MCM измерения и микромагнитное моделирование.

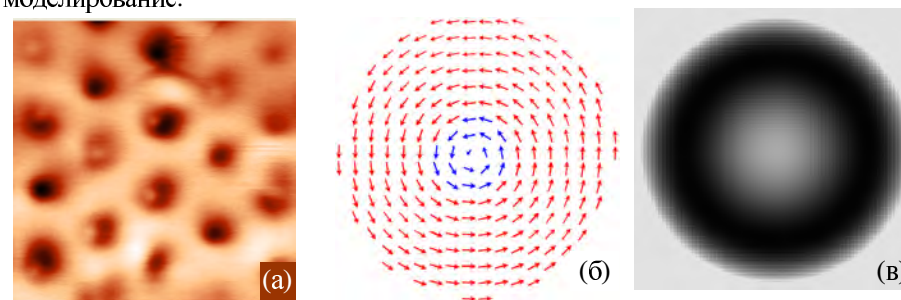


Рис. 5.

На рис. 5(а) представлено экспериментальное MCM изображение участка ферромагнитной гофрированной пленки. Распределение намагниченности в отдельных полусферах соответствует вихревому состоянию. На рис. 5(б) и 5(в) приведено полученное в результате микромагнитного моделирования

распределение намагниченности в отдельной полусфере и рассчитанное на его основе модельное MCM изображение.

На рис. 6(a) приведено экспериментальное MCM изображение участка ферромагнитной гофрированной пленки, находящейся в квазиоднородном – меридианальном состоянии. Соответствующее распределение намагниченности в отдельной полусфере, полученное из микромагнитного моделирования, представлено на рис. 6(б). Рассчитанное на его основе модельное MCM изображение показано на рис. 6(в).

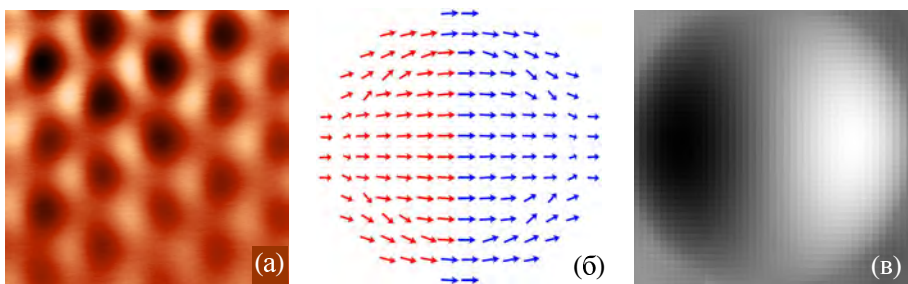


Рис. 6.

Таким образом, показано, что экспериментально регистрируемый MCM контраст соответствует квазиоднородному – меридиональному и вихревому состояниям в магнитных полусферах.

Глава 4 посвящена изучению магнитных свойств систем, в которых большую роль играет магнитостатическое взаимодействие между отдельными элементами. Современное развитие методов электронной литографии позволяет создавать ферромагнитные тонкопленочные наноструктуры с хорошо контролируруемыми размерами и формой элементов. Если расстояние между отдельными элементами системы достаточно малы, значительную роль начинают играть эффекты, связанные с магнитостатическим взаимодействием. В этом случае при перемагничивании во внешних полях поведение отдельного элемента ансамбля нанообъектов будет определяться не только свойствами самого этого объекта, но и пространственной конфигурацией магнитных моментов его окружения. Изучение подобных эффектов представляет интерес, как с научной, так и практической точки зрения.

Раздел 4.1 посвящен исследованиям особенностей движения доменной стенки в ферромагнитной нанопроволоке под действием внешнего магнитного поля в присутствии локальных полей рассеяния ферромагнитных наночастиц. Приведены результаты исследования системы, представляющей собой нанопроволоку и две частицы, являющиеся источниками локального магнитного поля. Проведены расчеты профиля энергии системы в зависимости от положения доменной стенки в нанопроволоке. Теоретически предсказано, что

взаимодействие намагниченности нанопроволоки с локальным магнитным полем, создаваемым наночастицами, может приводить к пиннингу доменной стенки. В зависимости от взаимной ориентации намагниченности нанопроволоки и наночастиц пиннинг происходит либо на потенциальном барьере в области непосредственно перед наночастицами, либо в потенциальной яме между наночастицами. Величина поля депиннинга зависит от конфигурации магнитных моментов наночастиц. В случае, когда магнитные моменты частиц направлены в противоположные стороны, величина поля депиннинга существенно больше, чем при сонаправленной ориентации магнитных моментов частиц.

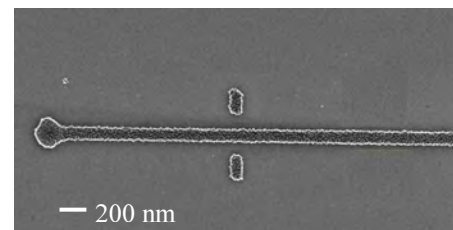


Рис. 7.

Был экспериментально исследован пиннинг доменной стенки в системе нанопроволока-наночастицы, изготовленной на основе $Co_{60}Fe_{40}$ [рис. 7]. Система имела следующие геометрические параметры: размер нанопроволоки составлял $20 \times 100 \times 2800$ нм, диаметр зарождающей части нанопроволоки 200 нм, размер частиц $20 \times 100 \times 200$ нм, расстояние между частицами и нанопроволокой 100 нм. В случае, когда магнитные моменты частиц были направлены в противоположные стороны, наблюдались оба варианта пиннинга доменной стенки: на потенциальном барьере и в потенциальной яме.

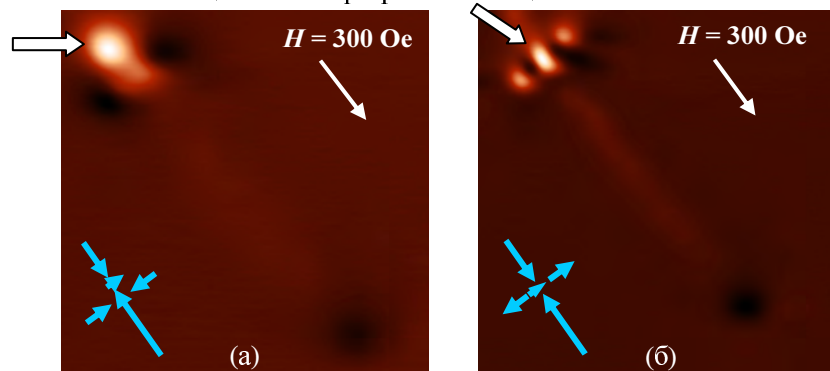


Рис. 8.

На рис. 8 приведены MCM изображения системы нанопроволока-наночастицы после зарождения в ней доменной стенки. Положение доменной

стенки показано стрелкой. В левом углу стрелками схематично изображено направление намагниченности в системе. Рис. 8(a) соответствует случаю пиннинга доменной стенки на потенциальном барьере, доменная стека расположена в области перед наночастицами. Рис. 8(б) соответствует пиннингу доменной стенки в потенциальной яме, и доменная стека расположена в области между наночастицами. Величина поля депиннинга в обоих случаях составила 560 Э. В случае, когда магнитные моменты частиц были направлены в одну сторону пиннинг доменной стенки экспериментально не наблюдался. Это объясняется тем, что поле депиннинга при такой магнитной конфигурации системы меньше поля зарождения доменной стенки, составляющего 300 Э.

На основе рассмотренной системы предложена модель и разработан алгоритм работы магнитной логической ячейки, выполняющей логическую операцию «исключающее ИЛИ». Входной информацией для такой системы служит направление намагниченности наночастиц, а выходной - направление намагниченности свободного конца нанопроволоки.

Раздел 4.2 посвящен изучению особенностей перемагничивания массивов ферромагнитных анизотропных (анизотропия формы) наночастиц, упорядоченных на двумерной гексагональной решетке. Рассмотрены массивы частиц $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ с различной величиной магнитостатического взаимодействия, которая регулировалась расстоянием между частицами. Исследовались как плотноупакованные массивы из большого числа частиц [рис. 9(a)], так и массивы, из шести частиц [рис. 9(б)]. Массив из шести частиц является основным структурным элементом большого массива.

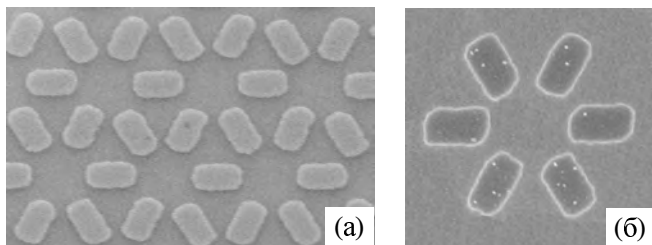


Рис. 9.

Простой анализ показывает, что в системе из шести частиц могут существовать восемь различных пространственных конфигураций магнитных моментов, различающихся вероятностью их реализации при случайных начальных условиях, эффективным магнитным зарядом на узле, эффективным магнитным моментом на узле и плотностью магнитостатической энергии. Экспериментально продемонстрировано, что при перемагничивании такой системы во внешнем поле реализуются два устойчивых магнитных состояния: квазиоднородное состояние [рис. 10(a), 11(a)] и состояние с нулевым магнитным моментом [рис. 10(б), 11(б)].

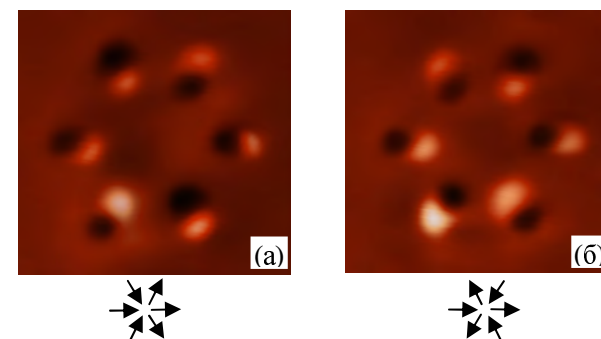


Рис. 10.

Было показано, что степень магнитостатического взаимодействия между ферромагнитными наночастицами определяет характер перемагничивания массива. При слабом магнитостатическом взаимодействии переход из квазиоднородного состояния в состояние с нулевым магнитным моментом происходит за счет переворота намагниченности частиц, расположенных под углом к внешнему полю [рис. 10]. При сильном взаимодействии переход происходит за счет переворота частиц, расположенных вдоль магнитного поля [рис. 11].

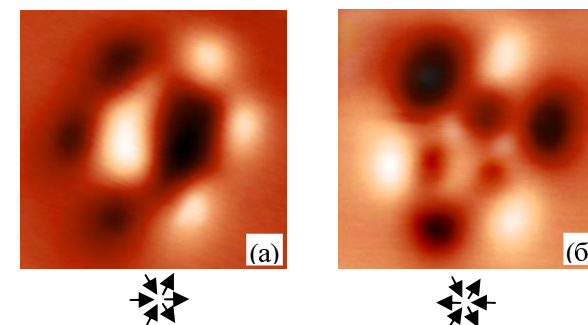


Рис. 11

Были проведены экспериментальные исследования особенностей индуцированного зондом перемагничивания массивов из шести частиц. Продемонстрировано, что количество магнитных состояний, реализуемых в системе определяется степенью магнитостатического взаимодействия между ее элементами. В системе со слабым взаимодействием может быть сформировано любое из восьми магнитных состояний, в том числе, состояние, обладающее максимальной энергией. Массив частиц с сильным магнитным взаимодействием нельзя перевести в состояние с высокой энергией. При селективном перемагничивании одной из частиц такого массива изменялось направление намагниченности не только той частицы, на которую оказывалось воздействие, но и соседних частиц.

Были проведены исследования особенностей перемагничивания плотноупакованного массива частиц, упорядоченного на двумерной гексагональной решетке [рис. 9(а)]. Показано, что в таком массиве сохраняются основные особенности перемагничивания уединенного узла из шести частиц. При перемагничивании массива в однородном внешнем поле в нем могут быть сформированы два устойчивых магнитных состояния – квазиоднородное и низкоэнергетическое состояние с нулевым магнитным моментом.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

1. Теоретически показано, что причиной возникновения искажений МСМ изображений, проявляющихся в виде неравной интенсивности максимумов и минимумов контраста, является возмущение намагниченности образца под действием вертикальной компоненты поля зонда магнитно-силового микроскопа.

2. Разработаны две экспериментальные методики формирования антивихревого состояния в ферромагнитных частицах крестообразной формы. Первая методика основана на перемагничивании асимметричных частиц, имеющих различную коэрцитивность сегментов креста в однородном внешнем поле. Вторая методика основана на воздействии зонда магнитно-силового микроскопа на распределение намагниченности в симметричных крестообразных частицах.

3. Исследованы особенности формирования МСМ изображений от ферромагнитной пленки, нанесенной на слой сферических частиц ПММА. Показано, что экспериментально регистрируемый МСМ контраст соответствует квази-однородному – меридианальному и вихревому состояниям в магнитных полусферах.

4. Экспериментально исследован процесс пиннинга доменной стенки локальным магнитным полем в ферромагнитной системе, представляющей собой нанопроволоку и две наночастицы, являющиеся источниками магнитного поля. Продемонстрировано, что величина поля депиннинга в такой системе определяется взаимной ориентацией магнитных моментов наночастиц. На основе этого эффекта предложен прототип магнитной логической ячейки, реализующей функцию «Исключающее ИЛИ».

Публикации

Результаты работы опубликованы в оригинальных статьях в отечественных и зарубежных журналах, сборниках трудов и тезисов докладов на научных конференциях. Всего по материалам диссертации опубликовано 35 работ, из них 10 журнальных статей. Полный список публикаций автора по теме диссертационной работы приведен в конце диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 175 страниц. Диссертация содержит 101 рисунок. Список литературы включает 123 наименования

Цитированная литература

- [1] Neubauer, A. Topological Hall Effect in the *A* Phase of MnSi / Neubauer A., Pfleiderer C., Binz B., Rosch A., Ritz R., Niklowitz P.G., Böni P. // *Physical Review Letters*. – 2009. – V.102. – P.186602.
- [2] Wang, H. Spin dynamics of a magnetic antivortex: Micromagnetic simulations / Wang H., Campbell C.E. // *Physical Review B*. – 2007. – V.76. – P.220407.
- [3] Gliga, S. Ultrafast dynamics of a magnetic antivortex: Micromagnetic simulations. / Gliga S., Yan M., Hertel R., Schneider. C.M. // *Physical Review B*. - 2008. - V.77. – P.060404.
- [4] Pokhil, T. Spin vortex states and hysteretic properties of submicron size NiFe elements / Pokhil T., Song D., Nowak J. // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – V. 87(9). – P.6319.
- [5] Garcia – Martin, J. M. Imaging magnetic vortices by magnetic force microscopy: experiments and modeling / J. M. Garcia – Martin, A. Thiaville, J. Miltat, T. Okuno, L. Vila, L. Piraux // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2004. – V.37. – P. 965.
- [6] Huo S. Magnetic force microscopy and micromagnetic study of cross – tie wall structures in Co₉₁Nb₆Zr₃ amorphous thin films / Huo S., Pan G., Mapps D.J., Clegg W.W., Heydon G., Rainforth W.M, Davies A.H., Bishop J.E.L., Tucker J.W, Gibbs M.R.J, // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – V.87. – N3 P.1096.
- [7] Shigeto, K. Magnetic force microscopy observation of antivortex core with perpendicular magnetization in patterned thin film of permalloy / Shigeto K., Okuno T., Mibu K., Shinjo T. // *Applied Physics. Letters*. – 2009. – V.80. – P.4190.
- [8] Im, M.Y. Direct Observation of Stochastic Domain – Wall Depinning in Magnetic Nanowires / Im M.Y., Bocklage L., Fisher P., Meier G. // *Physical Review. Letters*. – 2009. – V.102. – P.147204.
- [9] O’Brien, L. Bidirectional magnetic nanowire shift register / O’Brien L., Read D.E., Zeng H.T., Lewis E.R., Petit D., Cowburn R.P. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – V.95 – P.232502.
- [10] Amos, N. High-resolution and high-coercivity FePtL₁₀ magnetic force microscopy nanoprobe to study next-generation magnetic recording media / Amos N., Lavrenov A., Fernandez N., R., Ikkawi R., Litvinov D., Khizroev S., // *Journal of Applied Physics*. - 2009. - V.105. - P.07D526.
- [11] Haginoya, C. Thermomagnetic writing on 29 Gbit/in² patterned magnetic media / Haginoya C., Koike K., Hirayama Y., Yamamoto J., Ishibashi M., Kitakami O., Shimada Y. // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V.75. - P.3159.

Список работ автора

- [A1] Миронов, В.Л. Взаимодействие магнитного вихря с полем зонда магнитно-силового микроскопа / Миронов В.Л., Ермолаева О.Л. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - №8, – С.37.
- [A2] Миронов, В.Л. Влияние поля зонда магнитно-силового микроскопа на распределение намагниченности в исследуемых образцах / Миронов В.Л., Фраерман А.А, Ермолаева. О.Л. // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т.72. – №11. – С.1558.
- [A3] Миронов, В.Л. Оптимизация системы для записи информации на основе массива ферромагнитных частиц и магнитно-силового микроскопа / Миронов В.Л., Ермолаева О.Л. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009.– №10. – С.107.
- [A4] Миронов, В.Л. Оптимизация параметров зондов магнитно-силового микроскопа для исследования массивов сверхмалых ферромагнитных наночастиц: анализ амплитуды фазового контраста / Миронов В.Л., Ермолаева О.Л. // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – №6. – С.12-16.
- [A5] Mironov, V.L. Magnetic force microscope tip-induced remagnetization of CoPt nanodisks with perpendicular anisotropy / Mironov V.L., Gribkov B.A., Vdovichev S.N., Gusev S.A., Fraerman A.A., Ermolaeva O.L., Shubin A.B., Alexeev A.M., Zhdan P.A., Binns C. // Journal of Applied Physics. – 2009. – V.106. – P.053911.
- [A6] Sapozhnikov, M.V. Magnetic and optical properties of nanocorrugated Co films/ Sapozhnikov M.V., Gusev S.A., Rogov V.V., Ermolaeva O.L., Troitskii B.B., Khokhlova L.V., Smirnov D.A. // Applied physics letters. – 2010. – V.96. – P.122507.
- [A7] Mironov, V.L. Antivortex state in crosslike nanomagnets/ Mironov V.L., Ermolaeva O.L., Gusev S.A., Klimov A.Yu., Rogov V.V., Gribkov B.A., Udalov O.G., Fraerman A.A., Marsh R., Checkley C., Shaikhaidarov R., Petrashov V.T // Physical Review B. – 2010. – V.81. – P.094436.
- [A8] Миронов, В.Л. Управление магнитным состоянием массивов ферромагнитных наночастиц с помощью неоднородного поля зонда магнитно-силового микроскопа/ Миронов В.Л., Фраерман А.А., Грибков Б.А., Ермолаева О.Л., Климов А.Ю., Гусев С.А., Нефедов И.М., Шерешевский И.А. // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т.110. – №7. – С.708.
- [A9] Mironov, V.L. Field-controlled domain wall pinning-depinning effects in a ferromagnetic nanowire-nanoislands system / Mironov V.L., Ermolaeva O.L., Skorohodov E.V., Klimov A.Yu. // Physical Review B. – 2012. – V.85. – P.144418.
- [A10] Миронов, В.Л.