

На правах рукописи

Грибков Борис Александрович

**СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ И МАГНИТНЫХ
НАНОСТРУКТУР**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН (Н. Новгород)

Научные руководители: член – корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
Салашенко Н. Н.
кандидат физико-математических наук,
Миронов В. Л.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Бухараев А. А.

кандидат физико-математических наук
Дроздов М. Н.

Ведущая организация: Нижегородский государственный университет
им. Н.И.Лобачевского, Физический Факультет,
Научно-образовательный центр “Физика
твердотельных наноструктур” ННГУ.

Защита состоится « 16 » ноября 2006 г. в 16 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.098.01 в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП – 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
микроструктур РАН.

Автореферат разослан « 16 » октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Гайкович К.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

За последние двадцать лет сформировалось новое направление в исследовании свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением - сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [1 - 3]. Применение различных зондовых микроскопов, таких, как сканирующий туннельный (СТМ), атомно-силовой (АСМ), магнитно-силовой (МСМ), позволяет получать уникальную информацию о свойствах поверхности. Данная диссертационная работа посвящена развитию СЗМ методик и их применению для исследования особенностей микрорельефа сверхгладких поверхностей с различными типами микрошероховатостей и для исследования наномасштабных свойств различных магнитных наноструктур на основе ферромагнитных материалов.

Первая часть работы посвящена исследованиям шероховатости рельефа поверхности подложек, применяемых для изготовления многослойных зеркал рентгеновского диапазона длин волн [4, 5]. Традиционно для исследования наномасштабных неровностей рельефа поверхности применяются методы атомно-силовой микроскопии и рентгеновской рефлектометрии (РР). В силу различной природы взаимодействия АСМ зонда и рентгеновского излучения с исследуемым образцом эти методы дают различную информацию о микрошероховатостях поверхности. Поэтому существует ряд метрологических проблем, связанных со сравнением результатов измерений, получаемых АСМ и РР методами, и их адекватной интерпретации. Часть диссертационной работы посвящена сравнению возможностей АСМ и РР методик по исследованию микрорельефа поверхностей с различным типом неровностей.

Шероховатость поверхности исходной подложки является одним из основных факторов, влияющих на качество интерфейсов многослойных зеркал рентгеновского диапазона длин волн, и, в конечном итоге, на их отражательные характеристики. Особенно важно использование высококачественных подложек с предельно низким значением шероховатости при создании короткопериодных зеркал жесткого рентгеновского диапазона, так как с уменьшением периода отражающих слоев влияние шероховатости на характеристики изготавливаемого зеркала существенно увеличивается. С другой стороны, требования к качеству зеркал существенно возрастают при создании рентгенооптических установок, содержащих несколько отражательных элементов. Величина потерь интенсивности пучка в таких системах зависит от количества зеркал и от отражательных характеристик каждого из них, что также накладывает крайне жесткие требования на шероховатость поверхности подложек и шероховатость интерфейсов каждого из зеркал, входящих в систему. Достаточно большая часть данной работы посвящена проблеме АСМ контроля шероховатости сверхгладких плоских и асферических подложек, изготавливаемых методами глубокой полировки.

Вторая часть диссертационной работы посвящена МСМ исследованиям магнитных состояний в субмикронных ферромагнитных частицах. Массивы ферромагнитных наночастиц вызывают в настоящее время повышенный интерес, обусловленный, прежде всего, возможностью их применения в качестве источников неоднородного магнитного поля, датчиков слабых магнитных полей, а также в качестве среды для записи информации с высокой плотностью [6]. Особый интерес вызывают многослойные частицы, состоящие из нескольких ферромагнитных слоев разделенных немагнитными прослойками. Так, на базе двухслойных ферромагнитных наночастиц, разрабатываются спинвентильные приборы и структуры для записи информации [7]. С фундаментальной точки зрения интерес к многослойным ферромагнитным частицам обусловлен возможностью создания искусственных неколлинеарных состояний намагниченности. Структуры такого типа представляют несомненный интерес для изучения спинзависимых эффектов при исследовании электронного транспорта во внешних магнитных полях.

Массивы ферромагнитных наночастиц используются в качестве источников неоднородного магнитного поля, применяемых для управления свойствами чувствительных к магнитному полю объектов [6]. При этом, изменение состояний намагниченности отдельных частиц в массиве, позволит управлять величиной и структурой индуцированного такими источниками магнитного поля, на субмикронных масштабах. С этой точки зрения, проведенные в диссертационной работе исследования возможностей изменения магнитного состояния в наночастицах с помощью зонда магнитно-силового микроскопа являются новыми и актуальными.

Основные цели работы состояли в следующем:

1. Исследование возможности изготовления сверхгладких (со среднеквадратичной шероховатостью $\sim 0,2 - 0,3$ нм) подложек плоской и асферической формы, пригодных для изготовления высококачественных многослойных зеркал рентгеновского диапазона длин волн.
2. Исследование индуцированных магнитным полем зонда МСМ эффектов перемагничивания ферромагнитных частиц субмикронного размера.
3. МСМ исследования магнитных состояний в двухслойных (Co / Si / Co) ферромагнитных субмикронных частицах. Исследование возможности управления состоянием намагниченности в таких двухслойных частицах МСМ зондом.
4. МСМ исследования состояний намагниченности трехслойных (Co / Si / Co / Si / Co) ферромагнитных дисков субмикронного размера. В частности, исследование возможности реализации неколлинеарных распределений намагниченности в таких частицах.

Научная новизна работы

1. Впервые методом репликации сверхгладких эталонных пластин при помощи тонких слоев полимерных материалов изготовлены сверхгладкие подложки для зеркал рентгеновского диапазона длин волн. Методом АСМ показано хорошее совпадение параметра среднеквадратичной шероховатости эталонных пластин и изготовленных комбинированных подложек полимер-стекло.
2. Исследованы индуцированные магнитным полем зонда МСМ эффекты перемагничивания в субмикронных эллиптических ферромагнитных частицах, обладающих двумя метастабильными состояниями. Обнаружены индуцированные зондом МСМ обратимые переходы между однородным и одновихревым состоянием намагиченности. Впервые показана возможность управления направлением завихренности магнитного вихря в процессе перехода из однородного в вихревое состояние.
3. Исследованы состояния намагиченности в двухслойных ферромагнитных частицах субмикронного размера. В таких объектах впервые наблюдались индуцированные зондом МСМ переходы между ферромагнитной (вектора магнитных моментов в соседних ферромагнитных слоях сонаправлены) и антиферромагнитной (вектора магнитных моментов в соседних ферромагнитных слоях направлены в противоположные стороны) конфигурациями намагиченности в ферромагнитных слоях.
4. Проведены МСМ исследования субмикронных трехслойных ферромагнитных частиц в виде круглых дисков, представляющих собой три слоя ферромагнитного материала, разделенные немагнитными прослойками. Впервые экспериментально наблюдались неколлинеарные распределения намагиченности в таких многослойных объектах.

Практическая значимость работы

1. Совместно с НПО "Композит" (г. Москва) отработана технология глубокой полировки кварцевых подложек различной геометрии для изготовления рентгеновских зеркал. Данная технология позволяет получать высококачественные подложки с шероховатостью поверхности на уровне 0,2 – 0,3 нм.
2. Предложен и реализован метод репликации поверхностных структур при помощи тонких слоев полимерных материалов с разрешением до 30 нм. С помощью данного метода изготовлены высококачественные комбинированные подложки полимер-стекло, пригодные для создания многослойных зеркал рентгеновского диапазона длин волн.
3. Разработаны процедуры сканирования зондом МСМ, позволяющие эффективно управлять состояниями намагиченности в эллиптических ферромагнитных субмикронных частицах. Упорядоченные массивы таких ферромагнитных частиц использовались в ИФМ РАН в качестве

управляемых источников неоднородного магнитного поля, влияющих на транспортные свойства джозефсоновских контактов.

4. Показана возможность осуществления индуцированных МСМ зондом переходов между ферромагнитной и антиферромагнитной конфигурациями магнитных моментов в двухслойных (ферромагнетик / немагнитная прослойка / ферромагнетик) субмикронных частицах при помощи МСМ зонда. Исследования переходов между магнитными состояниями в таких объектах актуальны с точки зрения разработки и создания приборов спинтроники и сред для записи информации.

Основные положения выносимые на защиту

1. Проведенная совместно с НПО “Композит” оптимизация технологии глубокой полировки позволила изготовить сверхгладкие кварцевые подложки с шероховатостью на уровне 0,2-0,3 нм, пригодные для создания высококачественных рентгеновских зеркал.
2. Метод репликация сверхгладких эталонных поверхностей с помощью тонких слоев полимерных материалов позволяет изготавливать подложки с шероховатостью на уровне 0,3 нм, пригодные для создания зеркал рентгеновского диапазона длин волн.
3. Под действием поля зонда МСМ в эллиптических ферромагнитных частицах с высоким аспектным соотношением латеральных размеров происходят переходы между однородными состояниями с противоположно направленным магнитным моментом, а в частицах с малым аспектным соотношением переходы между состояниями с однородной намагниченностью и одновихревым состоянием.
4. Экспериментально осуществлено изменение знака завихренности магнитного вихря в субмикронной ферромагнитной частице под действием поля зонда МСМ посредством двухстадийного процесса, сопровождающегося переходом из вихревого в однородное состояние, а затем вновь в вихревое с заданным направлением завихренности.
5. Под действием поля зонда МСМ осуществлены контролируемые переходы между ферромагнитно- и антиферромагнитно - упорядоченными конфигурациями магнитных моментов в субмикронных двухслойных ферромагнитных частицах эллиптической формы.
6. В субмикронных трехслойных ферромагнитных дисках с сильным магнитостатическим взаимодействием между слоями реализуются неколлинеарные распределения намагниченности.

Личный вклад автора в получение результатов

- Равнозначный в сравнительные исследования шероховатостей подложек методами АСМ и РР (совместно с В.Л.Мироновым и А.А.Фраерманом) [А1, А3, А4, А12, А13, А15].

- Равнозначный в исследование возможности наномасштабной репликации поверхности при помощи тонких слоев полимерных материалов (совместно с В.Л.Мионовым и Д.Г.Волгуновым) [A2, A14, A16, A17].
- Основной в АСМ исследования шероховатости поверхности высокополированных подложек плоской и асферической формы, предназначенных для изготовления многослойных рентгеновских зеркал (совместно с Н.Н.Салашенко) [A23].
- Определяющий в исследовании индуцированного магнитным полем МСМ зонда перемагничивания субмикронных частиц Fe-Cr с однородной намагниченностью (совместно с В.Л.Мионовым) [A7, A11, A18, A21, A24].
- Основной в МСМ исследования возможности управления знаком завихренности одновихревого состояния в субмикронных частицах Со (совместно с В.Л.Мионовым) [A5, A7, A19, A20, A24, A25].
- Основной в МСМ исследования состояний намагниченности двухслойных и трехслойных субмикронных ферромагнитных частиц (совместно с Д.С.Никитушкиным, А.А.Фраерманом, В.Л.Мионовым) [A27, A28].

Апробация работы

Результаты данной диссертационной работы опубликованы в в отечественных и зарубежных журналах, а также докладывались на российских и международных конференциях:

International Conference “Interaction of radiation with solids”, Minsk, October 3-5, 2001; Всероссийское совещание “Рентгеновская оптика - 2002”, Н.Новгород, 18-21 марта 2002; International workshop “Scanning Probe microscopy – 2002”, N.Novgorod, March 3-6, 2002; “XIX Российская конференция по электронной микроскопии” п.Черноголовка, 28 – 31 мая 2002; 7-th international conference on nanometer-scale science and technology and 21-st European conference on surface science NANO-7, ECOSS-21, Malmo (Sweden) 24 – 28 June 2002; International Workshop “Scanning Probe Microscopy – 2003”, N.Novgorod, March 2-5, 2003; International Symposium “Nanomeeting- 2003”, Minsk, May 20 –23, 2003; The International Conference “Micro- and nanoelectronics - 2003”, Zvenigorod, October 6-10, 2003; International Workshop “Scanning Probe Microscopy – 2004”, N.Novgorod, May 2-6, 2004; Международный симпозиум “Нанофизика и нанoeлектроника – 2005”, Нижний Новгород, 25-29 марта, 2005; The International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2005” (*ICMNE-2005*), Zvenigorod, Moscow region, October 3-7, 2005; Международный симпозиум “Нанофизика и нанoeлектроника – 2006”, Нижний Новгород, 13-17 марта, 2006; Труды X международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микрoeлектроники” (Москва, 12-16 июня, 2006);

Публикации по теме диссертации

Всего по результатам диссертации опубликовано 38 работ, из них 11 статей в реферируемых журналах и 27 публикаций в материалах конференций. Избранный список публикаций автора по данной теме приводится в конце автореферата [A1-A28]. Полный список работ автора приводится в тексте диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 148 страниц. В диссертации содержится 73 рисунка и 1 таблица. Список литературы включает 140 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, поставлены цели работы, приведена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся основные положения, выносимые на защиту. Дана общая характеристика проведенных исследований.

Глава 1 представляет собой обзор литературы по теме диссертации. В **разделе 1.1.** приведен обзор работ, посвященных определению статистических характеристик поверхности образцов по данным АСМ измерений. Рассмотрены работы по исследованию среднеквадратичной шероховатости поверхности методом АСМ. Особое внимание уделяется сравнению АСМ и рентгеновских методов определения шероховатости поверхности подложек. В **разделе 1.2.** проанализированы работы по исследованию состояний намагниченности в однослойных и многослойных субмикронных ферромагнитных частицах методом магнитно-силовой микроскопии. Часть обзора посвящена работам по исследованию индуцированных зондом МСМ эффектов перемагничивания ферромагнитных частиц.

Глава 2 посвящена описанию методик, используемых для изготовления образцов, а также методов их исследования. В этой главе описываются используемые в ИФМ РАН методы изготовления упорядоченных массивов ферромагнитных частиц, в частности, электронная литография и интерференционная лазерная литография. Изложены основные принципы сканирующей зондовой микроскопии, в особенности, метода магнитно-силовой микроскопии. Подробно описано программное обеспечение, при помощи которого проводилось моделирование процессов индуцированного магнитным полем МСМ зонда перемагничивания субмикронных ферромагнитных частиц.

В **Главе 3** приведены результаты исследований шероховатости подложек для изготовления зеркал рентгеновского диапазона длин волн. В

разделе 3.1 приведены результаты сравнительных исследований шероховатости поверхности серии подложек из кварца методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской рефлектометрии (РР). По данным АСМ измерений рассчитывалась среднеквадратичная шероховатость поверхности для каждого кадра и строились масштабные зависимости шероховатости от размера кадра. Методами РР снимались угловые зависимости коэффициента отражения от исследуемой поверхности. Влияние шероховатости поверхности на коэффициент учитывалось посредством экспоненциального фактора Дебая-Валлера.

Было обнаружено, что в случае подложек с гауссовым распределением по высотам наблюдается хорошее совпадение значений среднеквадратичной шероховатости, полученным по данным АСМ (σ_{AFM}) и РР (σ_{XR}). В тоже время, в случае поверхностей с распределением отличным от гауссового наблюдалось расхождение между АСМ и РР значениями шероховатости. Теоретически и экспериментально было показано, что АСМ дает более адекватную информацию о шероховатостях поверхности [8]. Была разработана методика расчета эффективной шероховатости поверхности и угловой зависимости коэффициента отражения рентгеновского излучения в борновском приближении непосредственно по АСМ данным без привлечения каких-либо модельных представлений о характере шероховатости исследуемой поверхности. В результате показано хорошее совпадение РР измеренной шероховатости (σ_{XR}) со значением эффективной шероховатости (σ_{eff}), рассчитанным непосредственно по данным АСМ измерений (Рис. 1.). Рассчитанные по АСМ данным угловые зависимости коэффициента отражения рентгеновского излучения также хорошо совпадают с данными РР измерений.

В **разделе 3.2** приводятся результаты экспериментов по репликации поверхностных структур с помощью тонких слоев полимерных материалов. Полимерные реплики изготавливались следующим образом. На опорную поверхность стеклянной пластины с шероховатостью порядка 1 нм наносился тонкий слой жидкого преполимера. В качестве реплицирующих слоев использовались анаэробные акриловые герметики и фотополимерные композиции (“НИИ Полимеров”, Дзержинск, Россия). Стеклянная пластина с нанесенным преполимером соединялась с эталонной реплицируемой поверхностью из высокополированного кремния со среднеквадратичной шероховатостью поверхности 0,3 – 0,4 нм. В результате полимеризации между поверхностью стеклянной пластины и эталонной поверхностью формировался полимерный слой толщиной порядка 5 – 10 мкм. Изготовленная таким образом структура разделялась по границе полимер – эталонная поверхность. Полученные реплики исследовались методом атомно-силовой микроскопии.

АСМ исследования показали, что величина шероховатости изготовленных реплик практически совпадает со значением параметра шероховатости исходных реплицируемых пластин. Для определения разрешающей способности метода репликации были проведены АСМ исследования сопряженных участков поверхности эталонного образца и

полимерной реплики. Как показали результаты АСМ исследований, поверхность полимерной реплики хорошо передает особенности рельефа поверхности эталонного образца на нанометровых масштабах. Минимальные латеральные размеры реплицируемых особенностей с учетом конечных размеров зонда (порядка 20 нм) составляют порядка 30 нм.

В ИФМ РАН методами магнетронного напыления на комбинированных подложках полимер-стекло и на эталонных высокополированных кремниевых пластинах были изготовлены тестовые многослойные Mo-Si рентгеновские зеркала на длину волны 13,5 нм. Установлено, что полуширина спектральной зависимости коэффициентов отражения и их пиковые значения в максимуме для зеркал, изготовленных на обоих типах подложек, практически совпадают.

В **разделе 3.3** приводятся результаты АСМ исследований серии высокополированных кварцевых подложек, предназначенных для изготовления многослойных рентгеновских зеркал. Совместно с НПО “Композит” (Москва) отработана технология глубокой полировки плоских подложек, обеспечивающая получение поверхностей со среднеквадратичной шероховатостью в пределах 0,2 – 0,3 нм. Данная технология полировки плоских подложек была адаптирована для полировки образцов асферических подложек. В результате удалось изготовить образцы кварцевых асферических подложек со среднеквадратичной шероховатостью на уровне 0,25 нм.

В **Главе 4** представлены результаты исследований процессов управляемого перемагничивания субмикронных ферромагнитных частиц при помощи зонда МСМ. В **разделе 4.1** рассмотрены индуцированные магнитным полем МСМ зонда процессы перемагничивания частиц Fe-Cr с латеральными размерами 780 × 280 нм. Данные частицы имели два устойчивых состояния, соответствующих однородному распределению намагниченности вдоль длинной оси частицы. При сканировании массива частиц Fe-Cr в двухпроходной МСМ методике были обнаружены особенности, связанные с

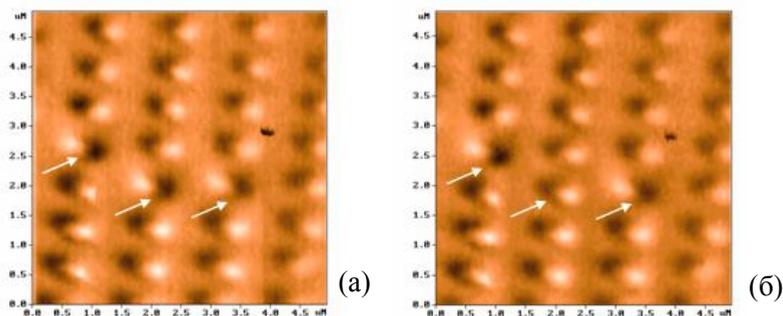


Рис. 1. Перемагничивание наночастиц Fe-Cr зондом МСМ. (Стрелками показаны частицы с измененной намагниченностью). Размер частиц 700 × 280 нм, толщина 20 нм.

изменением направления магнитного момента под действием магнитного поля МСМ зонда.

Было проведено микромагнитное моделирование процессов перемагничивания частиц Fe-Cr под действием неоднородного поля МСМ зонда. Показано, что перемагничивание происходит посредством сложной неоднородной перестройки распределения намагниченности внутри частицы.

Проведены эксперименты по контролируемому перемагничиванию отдельных частиц Fe-Cr зондом МСМ. Результаты локального перемагничивания частиц приведены на рисунке 1. Первоначально были перемагничены три соседние частицы (показаны стрелками на рисунке 2 (а)). Затем одна из них (центральная) была возвращена в начальное состояние.

В разделе 4.2 приведены результаты применения МСМ методик для управления направлением завихренности магнитного вихря в субмикронных эллиптических частицах Co, в которых могут реализовываться однородные и одновихревые состояния намагниченности.

При сканировании частиц ($600 \times 400 \times 27$ нм) в двухпроходной МСМ методике наблюдались переходы между одновихревыми и однородными состояниями намагниченности. Во время сканирования частиц вдоль длинной оси частица из одновихревого состояние намагниченности переходила в однородное и затем из однородного снова в одновихревое. В результате микромагнитного моделирования этих процессов было показано, что, используя различные траектории прохода МСМ зонда по однородно намагниченной частице, возможно получение одновихревых состояний с различным направлением завихренности.

Результаты экспериментов по управлению знаком завихренности одновихревого состояния намагниченности МСМ зондом приведены на рисунке 2. Исходное состояние центральной частицы на рис. 2 (а) соответствует правой ориентации магнитного вихря. МСМ изображение на рис. 2 (б) получено следующим образом. Вначале сканирование участка образца осуществлялось в однопроходной моде на расстоянии МСМ зонд – верхняя грань частицы порядка 50 нм. Затем, когда зонд проходил над средней частицей, высоту прохода уменьшили до величины порядка 10-15 нм; при этом был зафиксирован

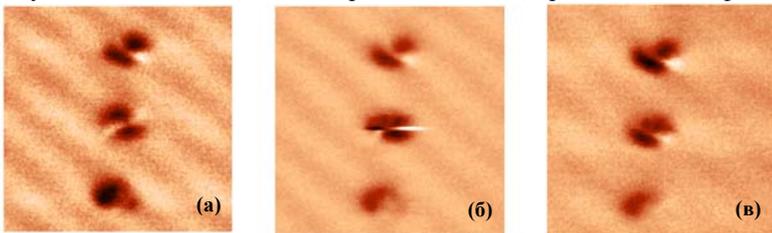


Рис. 2. МСМ изображения участка массива частиц Co. (а) Исходное состояние. (б) МСМ изображение тех же частиц, полученное в процессе сканировании образца с переменной высотой. (в) Конечное состояние.

переход между однородно намагниченным и одновихревым состоянием. При дальнейшем сканировании в области края средней частицы был зафиксирован переход между однородно намагниченным и одновихревым состояниями, после чего зонд вновь подняли на высоту 50 нм. Конечное состояние частиц показано на рис. 2 (в). В результате воздействия магнитного поля зонда МСМ средняя частица изменила направление завихренности магнитного вихря на противоположное.

Разработанные методики МСМ перемагничивания были успешно применены для управления транспортными свойствами гибридных систем ферромагнетик / сверхпроводник, представляющих собой джозефсоновские контакты различной геометрии с изготовленными на них ферромагнитными субмикронными частицами [9].

Глава 5 посвящена МСМ исследованиям многослойных ферромагнитных частиц, состоящих из нескольких ферромагнитных слоев, разделенных немагнитными прослойками.

В **разделе 5.1** представлены результаты МСМ исследований субмикронных эллиптических частиц (400×250 нм) состоящих из двух слоев Co толщиной 15 нм, разделенных прослойкой Si толщиной 3 нм. МСМ исследования показали, что в исследуемых двухслойных частицах наблюдаются два типа МСМ контраста (характерных для состояния с однородной намагниченностью), отличающиеся по интенсивности приблизительно в два раза. Проведенное моделирование МСМ изображений в таких двухслойных частицах и расчет зависимости амплитуды МСМ отклика от высоты прохода МСМ зонда над частицей показали, что МСМ изображение с меньшей амплитудой соответствует антиферромагнитной упорядоченности магнитных моментов в Co слоях (вектора магнитных моментов в соседних Co слоях направлены в противоположные стороны - $\uparrow\downarrow$), отклик же с большей амплитудой свидетельствует о ферромагнитной упорядоченности векторов (вектора магнитных моментов в соседних Co слоях сонаправлены - $\uparrow\uparrow$) магнитных моментов в Co слоях.

Проведены эксперименты по управлению состоянием намагниченности таких двухслойных частиц зондом МСМ. Показано, что при помощи специальных процедур сканирования возможно осуществление перехода из ($\uparrow\uparrow$) в ($\uparrow\downarrow$) конфигурацию магнитных моментов. Также возможна переориентация направлений магнитных моментов в ($\uparrow\downarrow$) конфигурации (одновременное перемагничивание верхнего и нижнего Co слоев) с помощью зонда МСМ.

В **разделе 5.2** приводятся результаты МСМ исследований трехслойных ($\text{Co} / \text{Si} / \text{Co} / \text{Si} / \text{Co}$) круглых дисков диаметром 300 нм. В результате численного моделирования были определены параметры трехслойной системы (толщины слоев Co и толщины прослоек Si), при которых в ней реализуются коллинеарные (все вектора намагниченности Co слоев параллельны) и неколлинеарные конфигурации намагниченности.

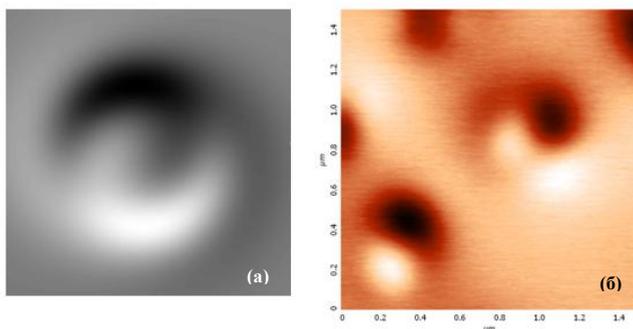


Рис. 3. MCM изображения спирального распределения в трехслойном ферромагнитном диске (диаметр 300 нм, Co слои 16/11/8 нм, прослойка Si 5 нм). Теоретически рассчитанное - (а) экспериментальное (б).

На основе данных расчетов были выбраны оптимальные значения толщин Co слоев и немагнитных Si прослоек, при которых с одной стороны, в трехслойных дисках реализуется неколлинеарные распределения с углами между векторами намагниченности в слоях Co близкими к 120° , а с другой стороны, MCM изображения таких частиц должны были содержать особенности, которые позволяли бы однозначно судить о наличии неколлинеарного распределения магнитных моментов в соседних слоях Co.

Было обнаружено хорошее совпадение теоретически рассчитанного (рис. 3(а)) и экспериментально полученного (рис. 3(б)) MCM изображений спирального распределения намагниченности в трехслойном диске диаметром 300 нм (толщины Co слоев 16 – 11 - 8 нм, прослойки Si 5 нм).

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Основные результаты работы

1. Проведены сравнительные АСМ и РР исследования шероховатостей поверхности подложек с различными типами неровностей. Для поверхностей с существенно негауссовым распределением по высотам наблюдается существенное расхождение в полученных АСМ и РР методами значениях шероховатости. Показано, что АСМ дает более адекватную информацию о шероховатостях поверхности. Развита методика расчета угловой зависимости зеркальной компоненты отраженного рентгеновского излучения и эффективной шероховатости непосредственно по АСМ профилям поверхности без использования каких-либо модельных представлений о характере неровностей рельефа. Показано, что угловые зависимости коэффициента отражения и эффективная шероховатость поверхности, рассчитанные непосредственно по АСМ данным, хорошо совпадают с результатами рентгеновских измерений.

2. Проведены сравнительные АСМ исследования рельефа поверхности подложек различной формы, предназначенных для изготовления элементов изображающей оптики рентгеновского диапазона длин волн. Совместно с НПО "Композит" проведена оптимизация технологии глубокой полировки кварцевых пластин, что позволило получить образцы сверхгладких плоских и асферических подложек с параметром среднеквадратичной шероховатости на уровне 0,2 нм.

3. Проведены эксперименты по репликации сверхгладких эталонных пластин с помощью тонких слоев полимерных материалов на стеклянных подложках. АСМ исследования показали, что величина шероховатости полимерных реплик совпадает с шероховатостью поверхности реплицируемых эталонных пластин. Рентгеновские зеркала, изготовленные на контрольных эталонных подложках и на комбинированных подложках полимер-стекло, имели идентичные спектральные зависимости коэффициентов отражения.

4. Проведены исследования индуцированных зондом магнитно-силового микроскопа процессов перемагничивания субмикронных ферромагнитных частиц. Экспериментально показано, что в частицах Fe-Cr (700×280 нм) под действием поля МСМ зонда происходят переходы между однородными состояниями с противоположным направлением намагниченности. Экспериментально показана возможность управляемого перемагничивания отдельных частиц Fe-Cr зондом МСМ.

В эллиптических частицах Co ($600 \times 400 \times 27$ нм) экспериментально наблюдались индуцированные зондом МСМ переходы между состояниями с однородным и вихревым распределением намагниченности. Микромагнитное моделирование показало, что возможно зарождение магнитного вихря выделенной ориентации при несимметричном сканировании частицы зондом МСМ. Впервые экспериментально осуществлено управление знаком завихренности магнитного вихря в процессе перехода из однородного в вихревое состояние.

5. Исследованы состояния намагниченности в многослойных субмикронных частицах, представляющих собой систему из нескольких слоев ферромагнетика, разделенных тонкими немагнитными прослойками.

Экспериментально установлено, что в частицах с латеральными размерами 400×250 нм, состоящих из двух слоев Co толщиной 15 нм, разделенных прослойкой Si толщиной 3 нм, реализуются два устойчивых состояния с ферромагнитной и антиферромагнитной ориентацией магнитных моментов в соседних слоях Co. Проведены эксперименты по перемагничиванию таких частиц зондом МСМ. Показано, что воздействие МСМ зонда на частицы приводит к ориентационным переходам двух типов: переходы из ферромагнитной в антиферромагнитную конфигурацию за счет переориентации

намагниченности верхнего слоя и переходы с изменением ориентации магнитного момента в обоих слоях.

Показано, что в трехслойных субмикронных круглых дисках возможна реализация, как коллинеарных состояний различной симметрии, так и состояний с неколлинеарной намагниченностью соседних слоев. В частицах, представляющих собой круглые диски диаметром 300 нм, содержащие три слоя Co с толщиной слоев 16 – 11 – 8 нм, разделенных прослойками Si толщиной 5 нм, впервые экспериментально зарегистрировано спиральное распределение MCM контраста, соответствующее неколлинеарной конфигурации магнитных моментов.

Список цитируемой литературы

- [1] Binnig, G. Tunneling through a controllable vacuum gap / G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber et al // Applied Physics Letters. – 1982. - V.40. – P.178 – 180.
- [2] Binnig, G. Atomic Force Microscope / G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber // Physical Review Letters. – 1986. – V.56. – P.930-933.
- [3] Wickramasinghe, H. K. Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution / Y. Martin, H. K. Wickramasinghe // Applied Physics Letters. – 1987. - V.50. – P.1455 – 1457.
- [4] Гапонов, С. В. Работы в области проекционной EUV-литографии в рамках российской программы / С. В. Гапонов, Е. Б. Клюенков, Н. Н. Салашенко и др. // Материалы международного симпозиума "Нанофизика и наноэлектроника" (Н.Новгород, 25-29 марта). – 2005. – Т.1. – С.44-47.
- [5] Андреев, С. С. Оптимизация технологии изготовления многослойных Mo/Si зеркал / С. С. Андреев, С. В. Гапонов, С. А. Гусев, С. Ю. Зуев, Е. Б. Клюенков, К.А. Прохоров, Н. И. Полушкин, Е. Н. Садова, Н. Н. Салашенко, Л. А. Суслов // Материалы всероссийского совещания "Рентгеновская оптика - 2000" (Н. Новгород, 22-25 февраля 2000 г.). – 2000ю – С.118-138.
- [6] Martin, J. I. Ordered magnetic nanostructures: Fabrication and properties / J. I. Martn, J. Nogues, K. Liu, J. L. Vicent, I. K. Schuller // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2003. – V.256. – P.449-501.
- [7] Zutic, I. Spintronics: fundamentals and applications / I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma // Review of Modern Physics. – 2004. - V.76. – P.323-410.
- [8] Востоков, Н. В. Определение эффективной шероховатости подложек из стекла в рентгеновском диапазоне длин волн по данным атомно-силовой микроскопии / Н. В. Востоков, С. В. Гапонов, В. Л. Миронов, А. И. Панфилов, Н. И. Полушкин, Н. Н. Салашенко, А. А. Фраерман, М. Н. Хайдл // Поверхность. – 2001. – Т.1. – С.38-42.
- [9] Вдовичев, С. Н. Свойства джозефсоновских контактов в неоднородном магнитном поле системы ферромагнитных частиц / С. Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, С. А. Гусев, Е. Ильичев, А. Ю. Климов, Ю. Н. Ноздрин, Г. Л. Пахомов, В. В. Рогов, Р. Штольц, А. А. Фраерман // Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т.80.- Вып.10. – С.758-762.

Избранный список работ автора по теме диссертации

- [A1] Fraerman, A. A. Determination of the X-ray mirror component angle dependence and effective surface roughness on the base of AFM measurements / A. A. Fraerman, S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salashchenko // *Physics of Low – Dimensional Structures*. - 2002. - V.5/6. - P.79-83.
- [A2] Бирюков, А. В. Исследование возможности получения сверхгладких подложек методом репликации эталонных поверхностей полимерными пленками / А. В. Бирюков, Д. Г. Волгунов, С. В. Гапонов, Б. А. Грибков, С. Ю. Зуев, В. Л. Миронов, Н. Н. Салашенко, Л. А. Суслов, С. А. Тресков // *Поверхность*. – 2003. - Т.1. - С.109-112.
- [A3] Бирюков, А. В. АСМ и РРМ исследования шероховатостей поверхности стеклянных подложек с негауссовым распределением по высотам / А. В. Бирюков, С. В. Гапонов, Б. А. Грибков, М. В. Зорина, В. Л. Миронов, Н. Н. Салашенко // *Поверхность*. – 2003. – Т.2. - С.17-20.
- [A4] Грибков, Б. А. Сравнительные исследования шероховатости поверхностей с негауссовым распределением по высотам методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновской рефлектометрии / Б. А. Грибков, В. Л. Миронов // *Заводская лаборатория*. – 2003. - Т.69. - С.29-34.
- [A5] Fraerman, A. A. Magnetic Force Microscopy to determine vorticity direction in elliptical Co nanoparticles / A. A. Fraerman, L. Belova, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, A. Yu. Klimov, V. L. Mironov, D. S. Nikitushkin, G. L. Pakhomov, K. V. Rao, V. B. Shevtsov, M. A. Silaev, S. N. Vdovichev // *Physics of Low – Dimensional Structures*. – 2004. – V.1/2. - P.35-40.
- [A6] Fraerman, A. A. On the possibility of non-contact investigation into ferromagnetic nanoparticles using Josephson magnetometer / A. A. Fraerman, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, A. Yu. Klimov, Yu. N. Nozdrin, G. L. Pakhomov, V. V. Rogov, S. N. Vdovichev // *Physics of Low – Dimensional Structures*. – 2004. – V.1/2. - P.111-116.
- [A7] Fraerman, A. A. Observation of MFM tip-induced remagnetization effects in elliptical ferromagnetic nanoparticles / A. A. Fraerman, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, V. L. Mironov, N. I. Polushkin, S. N. Vdovichev // *Physics of Low – Dimensional Structures*. – 2004. – V.1/2. - P.117-122.
- [A8] Вдовичев, С. Н. Свойства джозефсоновских контактов в неоднородном магнитном поле системы ферромагнитных частиц / С. Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, С. А. Гусев, Е. Ильичев, А. Ю. Климов, Ю. Н. Ноздрин, Г. Л. Пахомов, В. В. Рогов, Р. Штольтц, А. А. Фраерман // *Письма в ЖЭТФ*. – 2003. – Т.80.- Вып.10. – С.758-762.
- [A9] Vodolazov, D. Y. Considerable enhancement of the critical current in a superconducting film by a magnetized magnetic strip. / D. Y. Vodolazov, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, A. Yu. Klimov, Yu. N. Nozdrin, V. V. Rogov, S. N. Vdovichev // *Physical Review B*. – 2005. - V.72. – P.1-6.
- [A10] Vdovichev, S. N. Properties of Josephson junctions in the inhomogeneous magnetic field of a system of ferromagnetic particles. / S. N. Vdovichev, B. A.

Gribkov, S. A. Gusev, E. Il'ichev, Yu. N. Nozdrin, G. L. Pakhomov, A.V. Samokhvalov, R. Stolz, A. A. Fraerman // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – V.300. – P.202-205.

[A11] Грибков, Б. А. Исследование процессов локального перемагничивания в наночастицах Fe-Cr / Б. А. Грибков, В. Л. Миронов, Н. И. Полушкин, В. Б. Шевцов // Поверхность. – 2006. – Т.5. – С.19-21.

[A12] Gaponov, S. V. Comparative investigations of surface roughness by X-ray reflection and probe microscopy / S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salaschenko, A. A. Fraerman // Proceedings of International Conference “Interaction of radiation with solids” (Minsk, October 3-5). – 2001. - P.335-337.

[A13] Бирюков, А. В. АСМ и РРМ исследования шероховатостей поверхности стеклянных подложек с негауссовым распределением по высотам / А. В. Бирюков, С. В. Гапонов, Б. А. Грибков, М. В. Зорина, В. Л. Миронов, Н. Н. Салашченко // Труды Всероссийского совещания “Рентгеновская оптика - 2002” (Н.Новгород, 18-21 марта). - 2002. - С.241 - 244.

[A14] Gaponov, S. V. AFM investigations of the nanoscale roughness of polymer replicas on the glass substrates / S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salashchenko, D. G. Volgunov // Proceedings of International workshop “Scanning Probe microscopy – 2002” (N.Novgorod, March 3-6). – 2002. - P.140-142.

[A15] Fraerman, A. A. - Determination of the X-ray reflection angle dependence and the effective surface roughness in the X-ray range on the basis of AFM measurements / A. A. Fraerman, S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salashchenko // Proceedings of 7-th international conference on nanometer-scale science and technology and 21-st European conference on surface science NANO-7, ECOSS-21, Malmo (Sweden). – 2002. - P.38.

[A16] Gaponov, S. V. Polymer replication of supersmooth etalon surfaces for the X-ray optics application: SPM and X-ray investigations / S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salashchenko, D. G. Volgunov // Proceedings of 7-th international conference on nanometer-scale science and technology and 21-st European conference on surface science NANO-7, ECOSS-21, Malmo (Sweden). – 2002. - P.38.

[A17] Gaponov, S. V. Nano-scale surface replication by polymer layers: SPM and X-ray investigations / S. V. Gaponov, B. A. Gribkov, V. L. Mironov, N. N. Salashchenko, S. A. Treskov, D. G. Volgunov // Proceedings of International Symposium “Nanomeeting-2003” (Minsk, May 20 –23). – 2003. – P.262-265.

[A18] Polushkin, N. I. Characterization of patterned nanomagnet arrays by scanning probe microscopy / N. I. Polushkin, B. A. Gribkov, V. L. Mironov // Book of abstracts international conference “Micro- and nano electronics - 2003”, Zvenigorod, October 6-10. – 2003. - P.O1-21.

[A19] Fraerman, A. A. Observation of MFM tip induced remagnetization effects in elliptical ferromagnetic nanoparticles / A. A. Fraerman, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, V. L. Mironov, N. I. Polushkin, S. N. Vdovichev // Proceedings of International Workshop “Scanning Probe Microscopy – 2004” (N.Novgorod, May 2-6). – 2004. - P.95-98.

[A20] Fraerman, A. A. Magnetic force microscopy to determine vorticity direction in elliptical Co nanoparticles / A. A. Fraerman, B. A. Gribkov, S. A. Gusev, A. Yu. Klimov, V. L. Mironov, D. S. Nikitushkin, G. L. Pakhomov, V. B. Shevtsov, M. A. Silaev, S. N. Vdovichev // Proceedings of International Workshop "Scanning Probe Microscopy – 2004" (N. Novgorod, May 2-6). – 2004. – P.201-204.

[A21] Грибков, Б. А. Исследование процессов локального перемагничивания в наночастицах Fe-Cr / Б. А. Грибков, В. Л. Миронов, Н. И. Полушкин // Труды международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника - 2005", (Н.Новгород, 25-29 марта). – 2005. - С.178-179.

[A22] Никитушкин, Д. С. Моделирование МСМ изображений ферромагнитных наночастиц со сложным распределением намагниченности / Д. С. Никитушкин, Б. А. Грибков, В. Л. Миронов // Труды международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника - 2005", (Н.Новгород, 25-29 марта). – 2005. - С.184-185.

[A23] Грибков, Б. А. Изготовление асферических подложек с супергладкими поверхностями / Б. А. Грибков, Е. Б. Клюенков, Н. Н. Салащенко, В. А. Слемзин, И. Л. Струля // Труды международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника - 2005" (Н.Новгород, 25-29 марта). – 2005. – С.506-507.

[A24] Mironov, V. L. MFM tip induced remagnetization effects in elliptical ferromagnetic nanoparticles / V. L. Mironov, B. A. Gribkov, A. A. Fraerman, N. I. Polushkin, S. N. Vdovichev // Proceedings of International Symposium "Nanomeeting- 2005", (Minsk, May 24 –27). – 2005. - P.307-310.

[A25] Gribkov, B. A. MFM Tip Induced Remagnetization Effects in ferromagnetic sub-micron sized particles / B. A. Gribkov, S. A. Gusev, A. A. Fraerman, I. R. Karetnikova, V. L. Mironov, I. M. Nefedof, N. I. Polushkin, I. A. Shereshevsku, S. N. Vdovichev // Book of abstracts International conference " Micro- and nanoelectronics 2005". – 2005. - P.02–11D.

[A26] Сапожников, М. В. Влияние ферромагнитных наночастиц на транспортные свойства мостиков GaMnAs / М. В. Сапожников, Б. А. Грибков, А. А. Фраерман, Ю. А. Климов, Joonyeon Chang // Материалы X международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника" (Н.Новгород, 13-17 марта). – 2006. - С.253.

[A27] Грибков, Б. А. Магнитно-силовая микроскопия многослойных наночастиц на основе кобальта // Б. А. Грибков, А. А. Фраерман, Д. С. Никитушкин, С. А. Гусев, С. Н. Вдовичев, В. Б. Шевцов, В. Л. Миронов, С. В. Гапонов // Материалы X международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника" (Н.Новгород, 13-17 марта). – 2006. - С.225.

[A28] Миронов, В. Л. Магнитно-силовая микроскопия наночастиц на основе Co / В. Л. Миронов, Б. А. Грибков, А. А. Фраерман, С. А. Гусев, С. Н. Вдовичев, Д. С. Никитушкин, В. Б. Шевцов, И. Р. Каретникова, И. М. Нефедов, И. А. Шерешевский // Труды X международной школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (Москва, 12-16 июня). – 2006. - С.311-313.

Грибков Борис Александрович

**СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ
ШЕРОХОВАТОСТИ И МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР**

Автореферат

Подписано к печати 10 октября 2006 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН, 603950,
Нижний Новгород, ГСП – 105.