

На правах рукописи

Бизяев Дмитрий Анатольевич

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ МИКРО– И
НАНОСТРУКТУР МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ
МИКРОСКОПИИ

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ 2017

Работа выполнена в лаборатории физики и химии поверхности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук (КФТИ КазНЦ РАН)

Научный руководитель: **Бухараев Анастас Ахметович**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Фраерман Андрей Александрович**
доктор физико-математических наук,
Институт физики микроструктур РАН –
филиал ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии
наук», заведующий отделом (г. Нижний
Новгород)

Загорский Дмитрий Львович
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФНИЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН, ведущий научный
сотрудник (г. Москва)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет» (г. Уфа).

Защита состоится **2 июня 2017 года в 16³⁰ часов** на заседании диссертационного совета Д 002.191.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук по адресу: 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7, КФТИ КазНЦ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.kfti.knc.ru/about-institute/sovety/dissertation-council/news-and-announcements.php> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук.

Отзывы на автореферат (два заверенных экземпляра) просим отправлять по адресу: 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7, КФТИ КазНЦ РАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
Кандидат физ.-мат. наук

Р. И. Хайбуллин

Общая характеристика работы

Актуальность работы:

Возрастающий интерес к исследованию металлических ферромагнитных частиц или проволок микронного и нанометрового размера обусловлен широким спектром их применения. В последнее время для получения на поверхности подложки отдельно расположенных частиц широко используется сканирующая зондовая литография (СЗЛ). Модификация и разработка методов СЗЛ для получения высококачественных масок в толстых полимерных плёнках является актуальной задачей.

В последние годы получило широкое развитие одно из направлений СЗЛ – зарядовая зондовая литография. Она основана на локальном воздействии электрического потенциала иглы микроскопа на электрофизические свойства образца. В результате такого воздействия на его поверхности образуются зарядовые области. Визуализация зарядовых областей осуществляется с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), работающей в режиме Кельвин-зондовой микроскопии (КЗМ). Относительно недавно были начаты исследования долгоживущих зарядовых областей в ряде мультиферроиков (например в манганитах). В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные по влиянию внешнего магнитного поля на формирование зарядовых областей, а процессы записи, перезаписи и релаксации таких областей слабо изучены. Поэтому исследования свойств долгоживущих зарядовых областей так же являются актуальными.

Метод магнитной силовой микроскопии (МСМ) позволяет проводить магнитные исследования с высоким пространственным разрешением. В том случае, когда МСМ исследования проводятся в присутствии внешнего магнитного поля, необходимо знание коэрцитивных свойств используемых магнитных зондов из-за их возможного перемагничивания внешним полем.

Для изменения намагниченности в образце в последнее время все чаще применяются и другие методы. Например, действие импульса тока высокой плотности вызывает изменение магнитной структуры нанопроволок. Данные структуры находят широкое применение в объектах спинтроники и элементах

памяти, поэтому исследование трансформации их магнитной структуры является актуальным.

Цель и задачи работы.

На основании вышеизложенного **целью** диссертационной работы является развитие методов СЗМ для решения задач нанолитографии и создания перспективных для спинтроники магнитных микро- и наноструктур, а также установление влияния геометрических факторов полученных структур, внешнего магнитного поля или протекающего электрического тока, на их магнитные и электрофизические характеристики.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

- Усовершенствовать метод СЗЛ и адаптировать его для создания литографических масок в полимерных пленках различной толщины для последующего формирования наноразмерных структур кобальта и никеля.
- Исследовать влияние внешних факторов, таких как время и внешнее магнитное поле, на величину потенциала зарядовых областей, создаваемых с помощью зарядовой зондовой литографии вблизи поверхности лантан-стронциевых манганитов.
- Разработать методику определения коэрцитивной силы магнитных зондов, используемых в МСМ. Провести сопоставление экспериментальных и смоделированных МСМ изображений, полученных от тестовых микрочастиц при разной напряженности внешнего магнитного поля.
- Разработать методику определения температуры Кюри для магнитных нанопроволок, измеряя их вольт-амперные характеристики при различной начальной температуре. Определить с ее помощью температуру Кюри нанопроволок никеля, сформированных с использованием методов СЗЛ.
- Исследовать методом МСМ магнитную доменную структуру нанопроволок никеля различного сечения до и после пропускания через них импульса тока высокой плотности. Сопоставить полученные данные с результатами компьютерного моделирования по перемагничиванию

нанопроволок никеля. Установить влияние геометрических размеров и протекающего тока на распределение намагниченности в таких проволоках.

Научная новизна работы состоит:

- в разработке и усовершенствовании методов СЗЛ для получения масок в полимерных пленках полиметилметакрилата (ПММА) толщиной более 100 нм. Впервые для улучшения качества получаемых масок в СЗЛ применен селективный химический растворитель сложного состава.
- в разработке новой методики определения коэрцитивной силы для используемых в МСМ магнитных.
- в разработке новой методики определения температуры Кюри, основанная на графическом анализе зависимости критической мощности тока, найденной из вольт–амперных характеристик нанопроволоки, полученных при разной температуре.
- в обнаружении влияния внешнего магнитного поля на величину поверхностного электрического потенциала в центре индуцированных состояний в лантан-стронциевых манганитах.
- в установлении механизма перераспределения намагниченности в нанопроволоках никеля при пропускании через них импульса тока высокой плотности.

Теоретическая и практическая значимость.

- Представленные в данной работе методы и технические решения СЗЛ могут быть использованы для формирования литографических масок в полимерных пленках полиметилметакрилата разной толщины.
- Установленная зависимость величины электрического потенциала зарядовых областей вблизи поверхности лантан-стронциевых манганитов от напряженности внешнего магнитного поля является подтверждением модели о фазовом разделении в манганитах.

- Разработанная методика позволяет определять коэрцитивную силу в направлении трудной оси намагничивания зондов МСМ. Знание величины этой силы позволяет более корректно интерпретировать данные, полученные с помощью МСМ измерений во внешних магнитных полях.
- Разработанная новая методика позволяет определять температуру Кюри в нанопроволоках из ферромагнитного материала.
- Установлен механизм перестройки намагниченности в никелевых нанопроволоках при пропускании через них импульсов тока высокой плотности.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Новые методологические приемы и технические решения, позволяющие получать маски методом сканирующей зондовой литографии для формирования наночастиц магнитных металлов с разным аспектным соотношением, а также металлических нанопроволок различного сечения как отдельно расположенных, так и с массивными контактами из разных металлов.
2. Величина электрического потенциала в центре индуцированных состояний на поверхности лантан-стронциевых манганитов определяется не только временем воздействия напряжения между иглой и образцом в зарядовой зондовой литографии, но и величиной внешнего магнитного поля.
3. Анализ МСМ изображений тестовых микрочастиц, регистрируемых при различных значениях величины и направления внешнего магнитного поля, позволяет определить величину коэрцитивной силы магнитного зонда в направлении трудной оси намагничивания.
4. Графический анализ зависимости критической мощности тока, найденной из вольт–амперных характеристик нанопроволоки, от ее температуры позволяет определить температуру Кюри нанопроволок различного сечения.
5. Пространственное распределение намагниченности в нанопроволоках никеля при пропускании импульса тока высокой плотности определяется

зависимостью константы магнитной анизотропии никеля от температуры и пиннингом магнитных моментов на краевых дефектах нанопроволоки.

Достоверность результатов работы определяется использованием современного научного сертифицированного оборудования для получения и исследования наноразмерных объектов из ферромагнитных материалов и зарядовых областей в лантан-стронциевых манганитах. Согласованностью полученных результатов и выводов с известными в научной литературе. Проведением компьютерного моделирования наблюдаемых явлений.

Личный вклад соискателя состоит: в разработке новых методологических приемов и усовершенствовании известных методик СЗЛ изготовления литографических масок для формирования микро- и наноразмерных структур; в проведении МСМ исследований сформированных магнитных наноструктур и экспериментов по зарядовой зондовой литографии на лантан-стронциевых манганитах; в участии в экспериментах по исследованию влияния импульса тока высокой плотности на магнитные характеристики нанопроволок; в изготовлении электромагнита для СЗМ микроскопа и проведении всех экспериментов с использованием внешнего магнитного поля; в обработке, анализе и интерпретации результатов проведенных исследований; в проведении всех компьютерных моделирований; в написании и подготовке научных статей для печати и в апробации результатов исследований выступлениями с докладами на конференциях различного уровня.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на Российских и Международных конференциях: Международный Евро-Азиатский симпозиум «Trends in magnetism» Eastmag - 2004 (Красноярск, 2004); X Международная конференция и школа семинар «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Дивноморское, 2006); Международные симпозиумы «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015); Российская конференция по электронной микроскопии (Черноголовка, 2012); Первая международная

конференция «Spin physics, spin chemistry and spin technology» (Казань, 2011); XIX Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (Москва, 2011); 3-я Всероссийская научная молодежная конференция «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (Уфа, 2015).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в семи научных статьях [A1-A7], опубликованных в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК, и в материалах и тезисах вышеперечисленных конференций [A8-A20].

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, литературного обзора, главы с методиками и техниками экспериментов, трех глав с результатами исследований и заключения. Работа изложена на 149 страницах и включает: 46 рисунков, 2 таблицы, список условных сокращений, список публикаций автора из 20 наименований и список цитируемой литературы из 149 наименований.

Содержание работы

Во Введении обозначена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, изложена научная и практическая значимость, а также кратко описаны объекты и методы исследований.

В первой главе приведен анализ последних достижений в области сканирующей зондовой и зарядовой литографии, описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований нанопроволок из различных магнитных материалов, в том числе под действием внешних факторов.

Во второй главе, являющейся методической частью, приведено описание приборов и методов приготовления образцов, а также методов их исследования.

Третья глава посвящена описанию усовершенствований стандартных методов СЗЛ, в которых удастся решить проблему использования полимерных пленок толщиной больше 50 нм. Также предлагаются новые способы и описываются недостатки их использования на имеющейся приборной базе. Показано, что использование селективного химического растворителя после

создания маски позволяет улучшить качество последней (рисунок 1а, б) при сохранении толщины пленки (рисунок 1 в, г). Кроме того, предлагаемые методы позволяют использовать один и тот же зонд многократно без ухудшения качества получаемых масок. Например, в разработанном методе многократного сканирования зонд много раз проходит по заданной области в контактном режиме работы атомно-силового микроскопа (АСМ) с силой, немного большей, чем при обычном сканировании с целью получения изображения топографии.

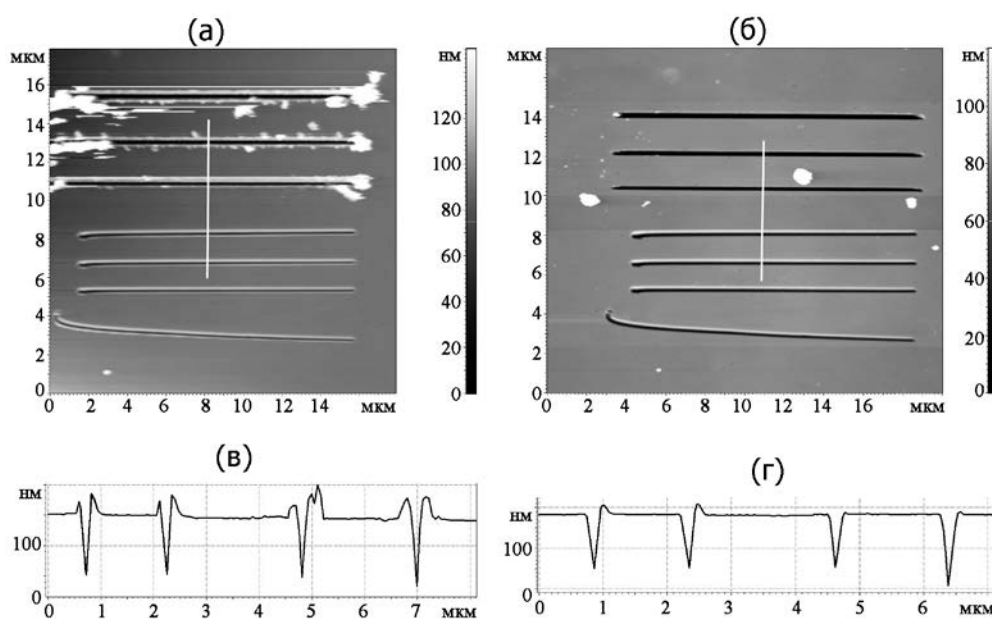


Рисунок 1. – АСМ изображения маски в пленке ПММА, изготовленной индентированием (нижние 4 полосы) и многократным сканированием вдоль одной линии (верхние 3 полосы), до (а) и после (б) химического травления, и соответствующие профили поверхности по линиям (в, г).

Также в главе рассматривается влияние внешнего магнитного поля на величину поверхностного электрического потенциала в центре индуцированных состояний, полученных с помощью другого метода СЗЛ – зарядовой зондовой литографии на поверхности лантан-стронциевых манганитов ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ для $x=0.1$ и 0.11). В этом методе структура создается в виде заряженных участков в приповерхностном слое образца. Визуализация таких структур производится с помощью КЗМ (рисунок 2а). Было обнаружено, что величина поверхностного электрического потенциала в центре индуцированного состояния в таких

кристаллах сильно зависит как от времени «записи», так и от величины внешнего магнитного поля (рисунок 2б).

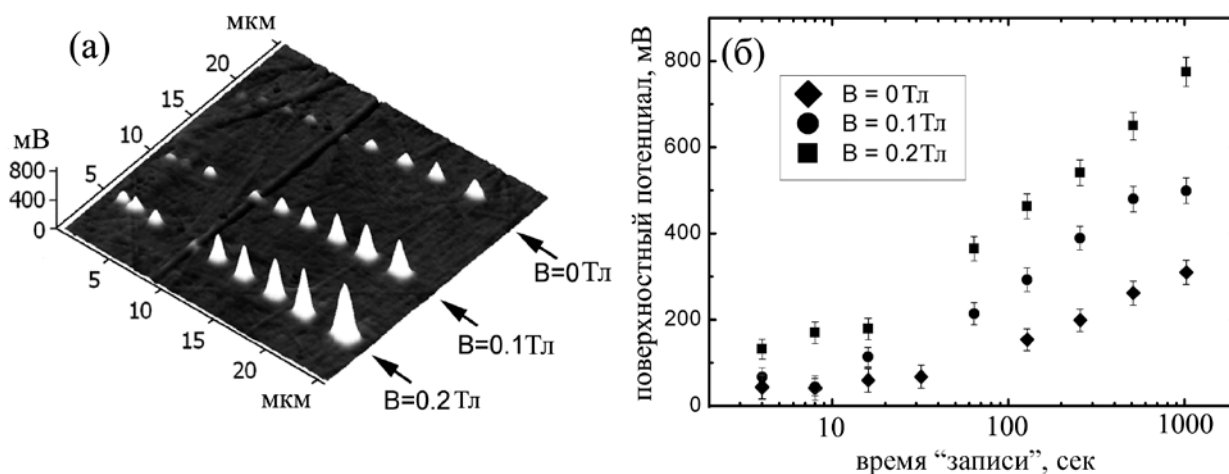


Рисунок 2. – КЗМ изображение поверхностного потенциала (а) и зависимость поверхностного потенциала индуцированных состояний от времени «записи» и величины внешнего магнитного поля (б).

Зависимость величины поверхностного электрического потенциала в центре индуцированного состояния от напряженности внешнего магнитного поля может быть объяснена с позиций модели зарядово-фазового разделения [1]. Согласно этой модели, в манганитах изначально имеются зарядовые области (кластеры), с размерами порядка 1-2 нм, обладающие положительным зарядом и магнитным порядком. В присутствии внешнего магнитного поля они увеличиваются в размерах. При приложении электрического потенциала между иглой и образцом происходит смещение этих кластеров относительно своих равновесных положений и накопление в них заряда. Кроме этого некоторые кластеры из-за увеличения размеров и смещения во внешнем электрическом поле могут образовывать перколяционную структуру. Это приводит к появлению больших связанных областей и значительному росту в них величины заряда. Как следствие, увеличивается величина поверхностного электрического потенциала [2].

В четвертой главе представлен метод определения коэрцитивной силы магнитных зондов в направлении их трудной оси намагничивания. Данный

метод основан на анализе профилей МСМ изображений, получаемых от тестовых микрочастиц кобальта в разных по величине и направлению внешних магнитных полях.

Изображения, получаемые с помощью МСМ, являются отображением действия магнитных сил между иглой микроскопа и образцом. Следовательно, МСМ игла может оказывать значительное влияние на регистрируемое МСМ изображение. Поскольку перемагничивание объекта исследуется обычно во внешнем магнитном поле, то действие этого поля может изменять как магнитную структуру образца, так и самой иглы. Поэтому для получения достоверной информации необходимо знать влияние внешнего магнитного поля на намагниченность МСМ зонда.

В относительно малых по величине внешних магнитных полях происходит трансформация доменной структуры образца, а вследствие большой коэрцитивной силы магнитного зонда его намагниченность остается неизменной. Таким образом, можно наблюдать перестройку доменной структуры объекта (рисунок 3а, б). Увеличение внешнего магнитного поля выше коэрцитивной силы образца приводит к его однородному намагничиванию (рисунок 3в). При достаточно сильном магнитном поле распределение намагниченности в игле и в образце будет однородным и сонаправленным вдоль приложенного поля (рисунок 3г). На профиле (рисунок 3г) в этом случае появляются дополнительные элементы (отмечены кругами) по сравнению с профилем, приведенном на рисунке 3в. Очевидно, что эти два дополнительных элемента связаны с состоянием намагниченности иглы.

В данной работе представлен метод, позволяющий определить коэрцитивную силу магнитных игл по анализу МСМ изображений, полученных от тестовой микрочастицы. Сдвиг фазы колебаний кантилевера в зависимости от величины внешнего магнитного поля пропорционален величине намагниченности иглы [3]:

$$\Delta\phi \approx \frac{Q}{k} \sum_i m_i \frac{\partial^2 H_i}{\partial z^2} \propto M_i, \quad (1)$$

где Q – добротность кантилевера, k – константа жесткости кантилевера, m_i – компонента магнитного момента иглы в i направлении, H – локальное магнитное поле образца.

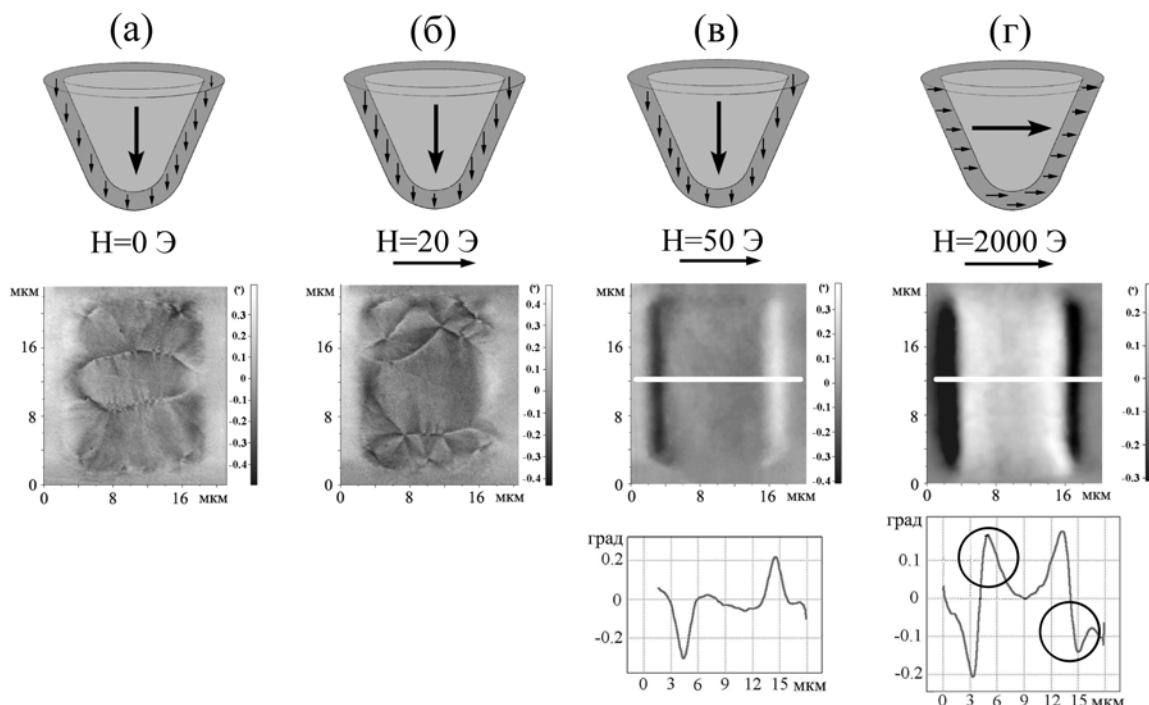


Рисунок 3. – Схематическое распределение магнитных моментов в игле и MFM изображение от частицы кобальта для разных по величине внешних магнитных полей: (а) – без поля, (б) – 20 Э, (в) – 50 Э, (г) – 2000 Э. Для полей 50 и 2000 Э приведены соответствующие профили. Кружками на профиле в поле 2000 Э отмечены дополнительные элементы. Большие стрелки в игле показывают направление суммарного магнитного момента в ней. Стрелки над частицей показывают направление внешнего магнитного поля.

Измеряя высоту Δh (сдвиг фазы колебаний кантилевера) дополнительного выступа/впадины, можно следить за изменением намагниченности иглы. С этой целью величину Δh лучше всего определять, как среднее значение Δh_{cp} суммы высот дополнительного выступа и впадины (рисунок 4а):

$$\Delta h_{cp} = (|\Delta h_1| + |\Delta h_2|)/2, \quad (2)$$

где Δh_1 и Δh_2 – высота дополнительной впадины и выступа соответственно.

Таким образом, измеряя Δh_{cp} , можно построить петлю гистерезиса для данной иглы (рисунок 4б).

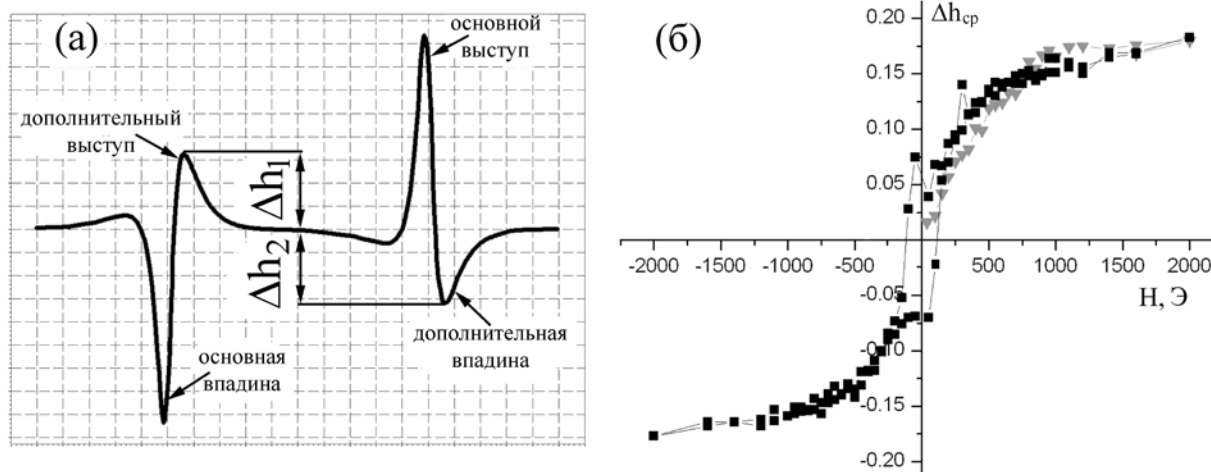


Рисунок 4. – Схема отчета величин Δh_1 и Δh_2 для вычисления Δh_{cp} – (а). Δh_1 и Δh_2 – высота дополнительного выступа и впадины соответственно. Петля гистерезиса для иглы с магнитным покрытием из кобальта – (б).

В результате были получены коэрцитивные силы для трех типов поликристаллических магнитных покрытий игл: *Co* – 125 Э, *CoCr* – 50 Э, *SmCo₅* – 300 Э.

Для интерпретации экспериментальных МСМ данных проводилось компьютерное моделирование с учетом поворота направления локальных магнитных моментов элементарных объемов иглы относительно поверхности образца (рисунок 3, см. схематическое изображение иглы). С его помощью были объяснены получаемые МСМ изображения во внешних магнитных полях.

В пятой главе приведены результаты исследований нанопроволок никеля различного сечения при пропускании через них импульсов тока высокой плотности. Представлена новая методика определения температуры Кюри (T_C), основанная на анализе вольт-амперных характеристик (ВАХ), полученных при разных температурах нанопроволоки. Рассматривается вопрос о влиянии морфологии и геометрических размеров проволок, а также величины импульса тока высокой плотности на их магнитную доменную структуру.

Импульс тока высокой плотности может привести к изменению магнитной структуры нанопроволок. При этом различают два основных механизма его действия. Первый механизм действия импульса тока обусловлен нагревом

провода выше T_C [4], который приводит к разрушению магнитной структуры. По окончании действия импульса тока образец остывает с последующим самопроизвольным намагничиванием. Второй механизм основан на взаимодействии спин-поляризованного тока (spin-transfer torque effect) [5] с магнитными моментами атомов решетки. Для определения возможности реализации второго механизма в нанопроволоках необходимо, чтобы выделяемое при прохождении импульса тока джоулево тепло не нагревало проволоку до T_C .

Нами предложен новый метод определения T_C , основанный на графическом анализе зависимости критической мощности тока от температуры нанопроволоки. Для этого регистрировались ВАХ никелевых нанопроволок при разных температурах. Полученные кривые преобразовывались в зависимость сопротивления от мощности, на которой, так же, как и на ВАХ, есть изгиб, характеризующий переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние нанопроволоки. Мощность, при которой на данной зависимости наблюдается изгиб, называется критической (P_{cr}) и соответствует мощности, необходимой для нагрева проволоки протекающим током до T_C . Точное значение P_{cr} определяется с помощью дифференцирования по мощности полученной зависимости. График $dR(P)/dP$ от P при разных температурах образца приведен на рисунке 5а. Построив зависимость P_{cr} от температуры нанопроволоки и аппроксимировав её прямой линией, можно найти T_C (рисунок 5б).

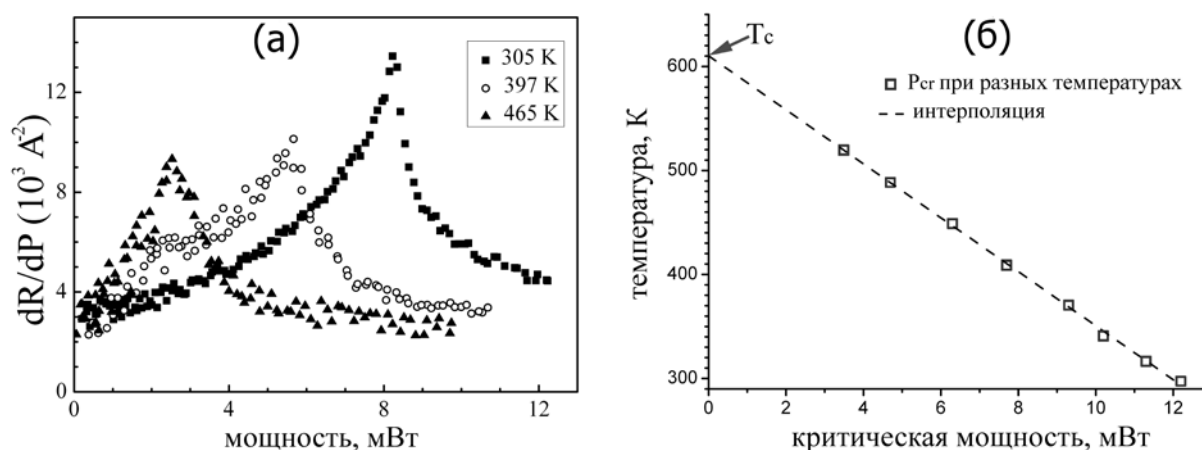


Рисунок 5. – Зависимость производных сопротивления по мощности от мощности при разных температурах образца – (а). Зависимость критической мощности от температуры образца – (б).

Для проволоки с сечением $23.5 \times 366 \text{ нм}^2$ и длиной 10 мкм (эффективный диаметр примерно 104.6 нм) T_C составила 610 К (рисунок 5б). Полученное значение хорошо согласуется со значением T_C (608 К [6]) проволоки никеля с эффективным диаметром 105 нм, измеренной с помощью метода, основанного на измерении намагниченности образца от его температуры $M(T)$.

Зная величины тока, при которых нанопроволоки никеля нагреваются до T_C , можно приступить к изучению трансформации доменной структуры нанопроволоки при пропускании через нее импульса тока.

На рисунке 6а представлено изображение никелевой проволоки с медными контактными площадками, полученное с помощью АСМ. Первые изменения в МСМ изображении такой нанопроволоки были зарегистрированы после прохождения импульса тока амплитудой около 70% от критической (I_{cr} нагревает проволоку до T_C). На представленных МСМ изображениях заметно изменение контраста в некоторых расположенных рядом друг с другом областях (обозначены стрелкой на рисунках 6б, в). Однако такой ток может привести к существенному нагреву проволоки. Как известно [7], при нагреве происходят изменения магнитных параметров ферромагнетика, таких как намагниченность насыщения и величина константы магнитной анизотропии. Это тоже может приводить к изменению распределения намагниченности образца. Поэтому необходимы дополнительные эксперименты по исследованию перемагничивания проволок при термическом нагреве.

С этой целью были исследованы образцы с никелевыми проволоками без электрических контактов (рисунок 6г). Визуализация распределения намагниченности такого образца показала, что после термического нагрева в вакууме распределение намагниченности в нем тоже изменяется. Также как и при подаче импульса тока амплитудой от 70% до критической, при термическом нагреве от 400 К до T_C наблюдались незначительные изменения в распределении намагниченности (рисунок 6д, е). Такое схожее поведение позволило предположить, что изменения в распределении намагниченности нанопроволоки при действии импульса тока, в основном, являются следствием ее нагрева током.

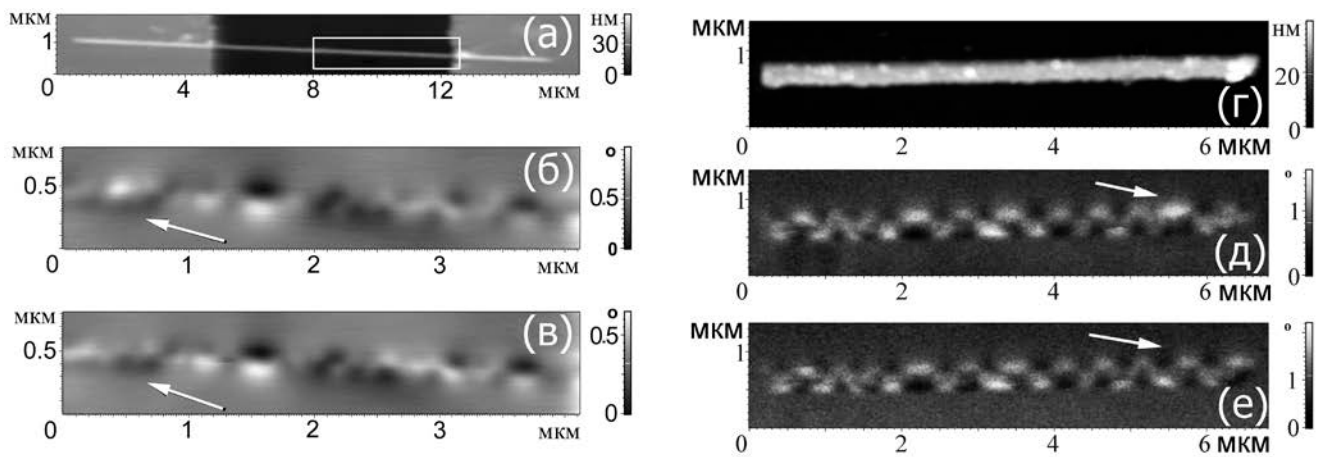


Рисунок 6. (а) – АСМ изображение никелевой нанопроволоки, с медными контактными площадками по бокам. (б) – МСМ изображение исходного распределения намагниченности фрагмента проволоки. Приведена только часть проволоки, обозначенная белым прямоугольником на АСМ изображении. (в) – МСМ изображение этого же фрагмента после импульса тока. (г) – АСМ изображение никелевой нанопроволоки без контактов. (д) – МСМ изображение исходного состояния распределения намагниченности проволоки без контактов. (е) – МСМ изображение после ее нагрева до 400 К. Стрелками обозначены области, где происходит изменение магнитного контраста после воздействия температурой или током.

Для анализа наблюдаемых изменений магнитной структуры было использовано компьютерное моделирование с помощью программы OOMMF [8]. Для сравнения с реальной проволокой использовалось оконтуривание ее АСМ изображения с целью получения всех неровностей по периметру (рисунок 7а). По результатам моделирования распределение намагниченности представляло собой зигзагообразную структуру с полюсами на краях проволоки. При этом на дефектах по периметру проволоки происходил пиннинг магнитных моментов, что приводило к изменению направления намагниченности (рисунок 7б). Сравнение экспериментального и смоделированного МСМ изображений (рисунок 6д и 7в соответственно) показывает их схожесть друг с другом. Видимые незначительные отличия могут быть связаны с фиксированной высотой у модельной проволоки.

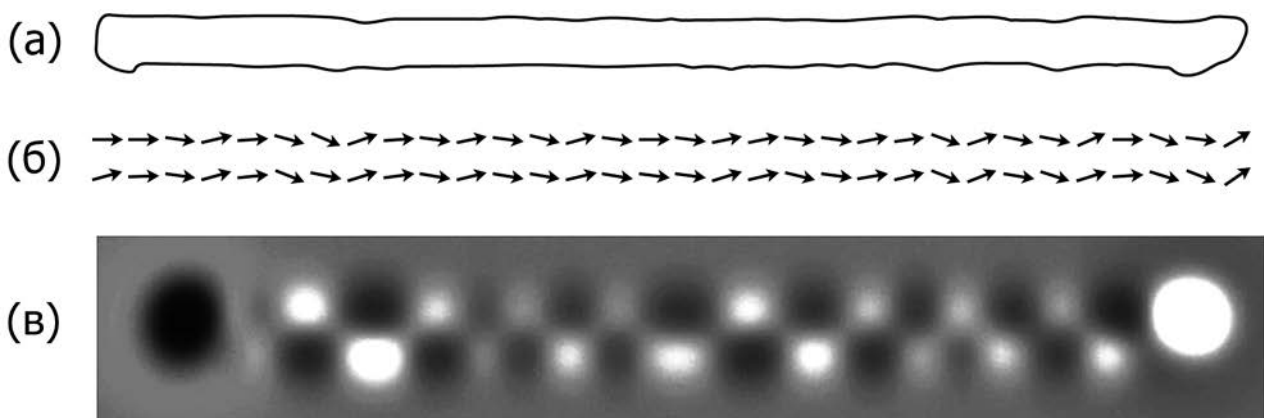


Рисунок 7. – (а) – контур реальной проволоки, и смоделированное в программе OOMMF распределение магнитных моментов – (б) в этой проволоке при температуре 300 К. Соответствующее этому распределению виртуальное МСМ изображение – (в).

Таким образом, моделирование показало, что у никелевой проволоки с сечением менее $30 \times 500 \text{ нм}^2$ отсутствует доменная стенка (рисунок 7б). По причине плавного характера изменения намагниченности в нанопроволоке степень спиновой поляризации тока, протекающего в ней, очень низкая или совсем отсутствует. Поэтому изменение намагниченности не может быть связано с действием спин-поляризованного тока.

Основываясь на результатах компьютерного моделирования и проведенных МСМ измерений можно сделать предположение о механизме действия импульсов тока высокой плотности на изменение распределения намагниченности в никелевой нанопроволоке. В момент протекания импульса тока происходит нагрев нанопроволоки. Когда температура нанопроволоки достигает значения 350 К, константа магнитной анизотропии никеля близка к нулю. В этот момент распределение намагниченности в ней становится однородным. После прохождения импульса тока происходит остывание нанопроволоки. При этом магнитная структура из однородно намагниченного состояния стремится вернуться в исходное. Однако вследствие пиннинга магнитных моментов на неровностях краев проволоки экспериментально наблюдалось другое распределение намагниченности.

В Заключении представлены основные результаты и выводы работы:

1. Усовершенствованы и разработаны методики сканирующей зондовой литографии для получения литографических масок в тонких (< 50 нм) и толстых (> 50 нм) полимерных пленках для изготовления наночастиц с разным аспектным соотношением, а также металлических нанопроволок как отдельно расположенных, так и с массивными контактами из одного или разных металлов.
2. Методом сканирующей зарядовой литографии в присутствии внешнего магнитного поля на поверхности кристаллов лантан-стронциевого манганита сформированы индуцированные состояния. Величина электрического потенциала таких состояний растет с увеличением величины внешнего магнитного поля. Это связано с расширением имеющихся в кристалле магнитных областей (кластеров) и увеличением заряда в них за счет действия внешнего магнитного поля, а также с возможным образованием из этих кластеров перколяционной структуры.
3. С помощью усовершенствованной программы моделирования объяснены наблюдаемые особенности на МСМ изображениях, полученных от тестовых микрочастиц во внешнем магнитном поле.
4. Разработана методика определения коэрцитивной силы магнитной иглы в направлении ее трудной оси намагничивания по МСМ изображениям тестовых микрочастиц.
5. Зарегистрирован фазовый переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние в нанопроволоке никеля при пропускании через нее импульса тока высокой плотности. Разработан новый способ определения температуры Кюри, основанный на графическом анализе зависимости критической мощности тока от начальной температуры нанопроволоки.
6. Установлено, что перестройка распределения намагниченности никелевой проволоки при пропускании импульса тока высокой плотности связана с зависимостью константы магнитной анизотропии никеля от температуры и пиннингом магнитных моментов на краевых дефектах нанопроволоки.

Цитируемая литература

1. Kugel, K. I. Phase Separation in Jahn-Teller Systems with Localized and Itinerant Electrons [Text] / K. I. Kugel, A. L. Rakhmanov, A. O. Sboychakov // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 95. – № 26. – P. 267210.
2. Mamin, R. F. Giant dielectric susceptibility and magneto-capacitance effects in low doped manganites [Text] / R. F. Mamin, V. V. Kabanov // New J. Phys. – 2014. – Vol. 16. – P. 073011.
3. Gomez, R. D. Magnetic imaging in the presence of external fields: Technique and applications [Text] / R. D. Gomez, E. R. Burke, I. D. Mayergoyz // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79. – № 8. – P. 6441-6446.
4. Temperature estimation in a ferromagnetic Fe–Ni nanowire involving a current-driven domain wall motion [Text] / A. Yamaguchi, A. Hirohata, T. Ono [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2012. – Vol. 24. – № 2. – P. 024201.
5. Ralph, D. C. Spin Transfer Torques [Text] / D. C. Ralph, M. D. Stiles // J. Magn. Magn. Mater. – 2008. – Vol. 320. – № 7. – P. 1190-1216.
6. Sun, L. Finite-size effects in nickel nanowire arrays [Text] / L. Sun, P.C. Searson, C. L. Chien // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61. – № 10. – P. R6463(R).
7. Бозорт, Р. Ферромагнетизм [Текст] / Р. Бозорт. – М. : ИИЛ, 1956. – С. 784.
8. Donahue, M. J. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) [Электронный ресурс] / M. J. Donahue, D. G. Porter // ITL/NIST. – 2006. – Режим доступа: <http://math.nist.gov/oommf/>. Проверено 15.03.2017.

Список публикаций автора по теме диссертации

I. Статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК

- A1. Magnetic force microscopy of magnetization reversal of microstructures *in situ* in the external field of up to 2000 Oe [Text] / A. A. Bukharaev, **D. A. Biziaev**, P. A. Borodin, D. A. Ovchinnikov // Proceedings of SPIE, Micro- and Nanoelectronics. – 2003. – Vol. 5401. – P. 555-560.
- A2. *In situ* Magnetization Reversal Measurement of Magnetic Tips in a Magnetic Force Microscope [Text] / A. A. Bukharaev, **D. A. Biziaev**, P. A. Borodin, D. V. Ovchinnikov // Phys. Low-Dim. Struct. – 2004. – Vol. 1/2. – P. 153-158.

- А3. Создание литографических масок с помощью сканирующего зондового микроскопа [Текст] / **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев, С. А. Зиганшина Н. И. Нургазизов, Т. Ф. Ханипов, А. П. Чукланов // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 6. – С. 437-447.
- А4. Магнитоэлектрические свойства и локально-индуцированные состояния в манганитах [Текст] / Р. Ф. Мамин, **Д. А. Бизяев**, Р. В. Юсупов, А. А. Бухараев // Известия РАН, Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 9. – С. 1196-1199.
- А5. Influence of magnetic field on electric-field-induced local polar states in manganites [Text] / R. F. Mamin, J. Strle, **D. A. Bizyaev**, R. V. Yusupov, V. V. Kabanov, A. Kranjec, M. Borovsak, D. Mihailovic, A. A. Bukharaev // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 107. – № 19. – P. 192906.
- А6. Определение температуры Кюри отдельной Ni нанопроволоки на основе анализа вольт-амперных характеристик [Текст] / Н. И. Нургазизов, **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев, В. Н. Лисин, А. П. Чукланов // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Т. 97. – № 3. – С. 161-164.
- А7. Нургазизов, Н. И. Магнитная структура никелевой нанопроволоки после воздействия импульса тока высокой плотности [Текст] / Н. И. Нургазизов, **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев // ФТТ. – 2016. – Т. 58. – № 5. – С. 917-922.

II. Тезисы и труды научных конференций

- А8. Measurement of magnetization reversal of microstructures with magnetic force microscope [Text] / А. А. Bukharaev, Р. А. Borodin, D. V. Ovchinnikov, **D. A. Biziaev** // Trends in magnetism : Abstract book of Euro-Asian Symposium Eastmag-2004 (Krasnoyarsk, Russia, 24-27 August 2004 г) – Krasnoyarsk: Kirensky Institute of Physics, 2004. – P. 381.
- А9. Сканирующая зондовая микроскопия микро- и наноструктур в сильных магнитных полях [Текст] / А. А. Бухараев, **Д. А. Бизяев**, П. А. Бородин, [и др.] // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники : Труды X Международной конференции и школы семинара ПЭМ-2006 (Дивноморское, Россия, 24-29 сентября 2006 г) в 2 ч. Часть 2. – Дивноморское, 2006. – С. 43-45.

- A10. Атомно- и магнитно-силовая микроскопия наночастиц металлов с электрокаталитическими свойствами [Текст] / С. А. Зиганшина, Л. И. Шамсетдинова, **Д. А. Бизяев** [и др.] // Нанофизика и наноэлектроника : сборник тезисов XXII Международного симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2008 г) в 2 т. Том 1. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2008. – С. 73-76.
- A11. Мамин, Р. Ф. Локально-индуцированные заряженные поляризационные состояния в манганитах [Текст] / Р. Ф. Мамин, **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев // Нанофизика и наноэлектроника : сборник тезисов XIV Международного симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 15-19 марта 2010 г) в 2 т. Том 2. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2010. – С. 319-320.
- A12. Индуцированные состояния с мультифункциональным поведением на поверхности манганитов [Текст] / Р. Ф. Мамин, **Д. А. Бизяев**, Р. В. Юсупов [и др.] // Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции ВКС-19 (Москва, Россия, 20-23 июня 2011 г) – Москва, 2011. – С. 216.
- A13. Применение СЗМ нанолитографии для формирования магнитных микро- и наноструктур [Текст] / **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев, Н. И. Нургазизов [и др.] // Нанофизика и наноэлектроника : сборник тезисов XV Международного Симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 14-18 марта 2011 г) в 2 т. Том 2. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2011. – С. 550-551.
- A14. Fabrication of magnetic nanostructures for the investigation of spin-dependent transport phenomena [Text] /A. Bukharaev, N. Nurgazizov, **D. Biziaev** [et al.] // Spin physics, spin chemistry, and spin technology : Abstracts of International conference (Kazan, Russia, 1-6 November 2011 г) – Kazan: Zavoisky Physical-Technical Institute, 2011. – P. 36.
- A15. Получение металлических наноконтактов и нанопроволок с помощью СЗМ методом индентирования [Текст] / А. А. Бухараев, Д. В. Лебедев, **Д. А. Бизяев** [и др.] // Нанофизика и наноэлектроника : сборник тезисов XVI Международного симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 12 -16

- марта 2012 г) в 2 т. Том 2. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – С. 468-469.
- A16. Получение структур из металлических наночастиц заданной формы и размера методом сканирующей зондовой литографии [Текст] / А. А. Бухараев, **Д. А. Бизяев**, Д. В. Лебедев [и др.] // Российская конференция по электронной микроскопии : труды XXIV Российской конференции РКЭМ-2012 (Москва, Черноголовка, Россия, 29 мая - 1 июня 2012 г) – Черноголовка, 2012. – С. 213.
- A17. Current-induced phase transition in Ni nanowires [Text] / N. Nurgazizov, A. Bukharaev, **D. Biziaev** [et al.] // Nanomaterials: Applications and Properties : Proceedings of the International Conference (NAP-2012) (Alushta, the Crimea, Ukraine, 17-22 September 2012 г) – Alushta: Sumy State University, 2012. – P. 04MFPN06.
- A18. Определение температуры Кюри нанопроволоки Ni путем регистрации фазового перехода, индуцированного током высокой плотности [Текст] / Н. И. Нургазизов, **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев [и др.] // Нанофизика и нанoeлектроника : сборник тезисов XVII Международного симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 11-15 марта 2013 г) в 2 т. Том 1. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. – С. 94-95.
- A19. Нургазизов, Н. И. Изучение изменения магнитной структуры ферромагнитной нанопроволоки под действием тока высокой плотности [Текст] / Н. И. Нургазизов, **Д. А. Бизяев**, А. А. Бухараев // Нанофизика и нанoeлектроника : сборник тезисов XIX Международного симпозиума (Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2015 г) в 2 т. Том 1. – Ниж. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2015. – С. 231-232.
- A20. **Бизяев, Д. А.** Распределение намагниченности в структурах, полученных с помощью сканирующей зондовой литографии [Текст] / Д. А. Бизяев, Н. И. Нургазизов, А. А. Бухараев // Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники : сборник тезисов докладов 3-ей Всероссийской научной молодежной конференции (Уфа, Россия, 1-4 декабря 2015 г) – Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2015. – С. 134.