

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

УДК 538.9

№ 01201056532

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор,  
профессор**

\_\_\_\_\_ **З. Ф. Красильник**  
**« 27 » апреля 2012 г.**

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009-2013 годы

по государственному контракту от «22» марта 2010 г. № 02.740.11.0540

**по теме:**

**РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
НАНОСТРУКТУР**

**(промежуточный, 5 этап)**

Наименование этапа: “Создание технологических и измерительных стендов,  
изготовление образцов, проведение измерений, выполнение расчетов,  
построение теоретических моделей.

Обработка результатов измерений, сравнительный анализ экспериментальных и теоретических  
данных.”

Руководитель темы:

\_\_\_\_\_

**С. В. Гапонов**

подпись, дата

**Нижний Новгород 2012**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, советник РАН, академик	_____	С. В. Гапонов (введение, заключение)
	подпись, дата	
Исполнители темы:		
Член.-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав.отд.	_____	Н.Н. Салашенко (раздел 6-8)
Зам. директора, д.ф.-м.н.	_____	А.А. Фраерман (раздел 1-3)
Зам. директора, д.ф.-м.н.	_____	А.С. Мельников (раздел 4)
зав. лаб., д.ф.-м.н.	_____	Н.И. Чхало (введение, раздел 6-8)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С. А. Гусев (раздел 1)
В.н.с., д.ф.-м.н.	_____	В.Л. Миронов (раздел 1)
зав. лаб., д.ф.-м.н.	_____	И.А. Шерешевский (раздел 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	И.М. Нефедов (раздел 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.В. Самохвалов (раздел 4)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	И.Д. Токман (раздел 5)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Ю. Аладышкин (раздел 4)
С.н.с., к.ф.-м.н., нормоконтролер	_____	Д.Ю. Водолазов (введение, заклучение)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С.Н. Вдовичев (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	М. М. Барышева (раздел 6)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Б.А. Грибков (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Е. Пестов (раздел 7)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Д.А. Рыжов (раздел 4-5)

Н.с., к.ф.-м.н.	_____	М.А. Силаев (раздел 4)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	О.Г. Удалов (раздел 1-3)
Н.с.	_____	А.Я. Лопатин (раздел 6-7)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.В. Чигинев (раздел 4)
М.н.с	_____	В.Н. Полковников (раздел 6-7)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Е.Е. Пестов (раздел 4)
М.н.с	_____	Н.Н. Цыбин (раздел 7)
Ведущий инженер электроник	_____	С.Ю. Зуев (раздел 6)
Ведущий инженер-технолог	_____	А.Ю. Климов (раздел 8)
Ведущий инженер-технолог	_____	В.В. Рогов (раздел 8)
Инженер 2-й категории	_____	М.Н. Торопов (раздел 7-8)
М.н.с	_____	О.Л. Ермолаева (раздел 1-2)
Инженер 2-й категории	_____	Е.В. Скороходов (раздел 1-2)
М.н.с	_____	Д. А. Савинов (раздел 5)
Аспирант	_____	К.Р. Мухаматчин (раздел 3)
Аспирант	_____	Е.А. Караштин (раздел 3)
Аспирант	_____	И. М. Хаймович (раздел 4)
Аспирант	_____	С. В. Миронов (раздел 4)
Аспирант	_____	А. А. Беспалов (раздел 5)

Аспирант	_____	П. К. Гайкович (раздел 7)
Аспирант	_____	Д. А. Татарский (раздел 3)
Аспирант	_____	А. В. Щербаков (раздел 7)
Студент	_____	А.Н. Зотова (раздел 4)
Студент	_____	А.В. Путилов (раздел 4)
Студент	_____	А. А. Смирнов (раздел 5)
Студент	_____	С.Н. Кузнецова (раздел 5)

## Реферат

Отчет 53 страницы, 8 частей, 24 рисунка, 8 источников.

### НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СИСТЕМЫ, МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ, НАНОЛИТОГРАФИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 этапу Государственного контракта № 02.740.11.0540 "Рентгенооптические и транспортные свойства металлических наноструктур" от 22 марта 2010 в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Целью работы на 5 этапе являлось выполнение ряда технологических, экспериментальных и теоретических работ, направленных на: (а) экспериментальное исследование ферромагнитных свойств металлических наноструктур, (б) теоретическое исследование гибридных структур сверхпроводник/ферромагнетик, (в) развитие методов создания и рентгенооптической диагностики структурных свойств металлических наноструктурированных систем. В частности, на пятом этапе были получены следующие результаты:

1. Экспериментально и теоретически исследовано распределение магнитных моментов в многослойных частицах, состоящих из трех ферромагнитных слоев, разделенных диэлектрическими прослойками. Экспериментальные данные о магнитном состоянии частиц получены путем измерения их магнитосопротивления. Показано, что в нулевом внешнем поле многослойная частица, обладающая анизотропией типа легкая плоскость, находится в неколлинеарном спиральном состоянии.

2. Разработаны методики создания крестообразных и круглых магнитных наночастиц с вихревым и антивихревым распределением намагниченности, а также разработана методика подведения контактов к таким частицам. Разработана методика перевода таких частиц из состояния с однородным распределением намагниченности в состояние с антивихревым (и обратно) с помощью зонда МСМ, а также с помощью внешнего однородного магнитного поля. Разработана методика подведения контактов к многослойным магнитным наночастицам для проведения транспортных исследований с пропусканием тока поперек слоев.

3. Изготовлены крестообразные частицы (с размерами порядка 200 нанометров) с антивихревым распределением намагниченности и подведены контакты к таким частицам. Продемонстрировано, что сопротивление контактов между частицей и токовыми шинами мало по

сравнению с сопротивлением самой частицы, что позволяет говорить о возможности исследования “топологического” эффекта Холла в такой системе.

4. Проведен анализ экспериментальных данных по асимметрии критического тока (диодного эффекта), обнаруженного нами ранее в гибридной структуре сверхпроводник/ферромагнетик (Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>). Теоретический анализ показал, что данный эффект связан с формированием канала, свободного от вихрей Абрикосова, что увеличивает величину критического тока, текущего через сверхпроводящий мостик без диссипации. Показано, что такая область появляется только в определенном диапазоне токов и внешних магнитных полей.

5. Для системы магнито-мягкий диполь – вихрь в тонкой сверхпроводящей плёнке рассчитаны энергетически выгодные состояния, в частности, вычислены углы ориентации диполя и определено положение вихря относительно диполя, для различных значений параметра магнитной анизотропии диполя и его высоты над плёнкой.

6. Впервые в России продемонстрированы литографические изображения в резистах, полученные с помощью метода проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Измерены скорости засветки фоторезиста и загрязнения поверхности коллектора. Анализируются факторы, ограничивающие пространственное разрешение проекционной схемы.

7. В рамках календарного плана исследованы химически усиленные резисты на основе полиметакрилатов с алициклическими изоборнильными группами, претерпевающими кислотный гидролиз на стадии постэкспозиционного прогрева (ПЭП) после экспонирования их ультрафиолетовым (УФ) и экстремальным ультрафиолетовым (ЭУФ) излучением, длины волн 254 нм и 13.5 нм, соответственно, и электронным лучом.

8. В результате проведенных исследований развиты методы формирования искусственных упорядоченных решеток магнитных наноструктур, состоящих из частиц контролируемой формы с минимальными планарными размерами ~ 30 нм. Получены изображения с магнитным контрастом.

На основе полученных теоретических и экспериментальных результатов подготовлены материалы, раскрывающие содержание работ по решению поставленных научно-исследовательских задач, включая:

1. Результаты исследования поперечного спин-зависимого транспорта в многослойных нанодисках, содержащих три слоя ферромагнетика, разделенных немагнитными прослойками. Изучение диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков.
2. Разработка методик измерений эффектов, связанных с «топологическим» эффектом Холла, а также эффектов связанных с выпрямлением переменного электрического тока в структурах со спиральным распределением намагниченности.

3. Результаты исследования эффектов, связанных с топологическим эффектом Холла в нанодисках с вихревым распределением намагниченности.
4. Анализ экспериментальных данных, полученных для гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, и сравнение их с результатами теоретических расчетов.
5. Расчёт энергетически выгодной ориентации намагниченности свободно вращающейся ферромагнитной частицы над сверхпроводником и структуры стабильного вихревого состояния в сверхпроводнике.
6. Результаты исследования пространственного разрешения проекционной схемы нанолитографа в зависимости от числовой апертуры объектива и толщины фоторезиста.
7. Оптимизация химического состава и изучение отечественных фоторезистов на основе ПММА.
8. Создание образцов магнитных наноструктур с топологическими нормами 30 нм.

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по 5 этапу. По результатам работы опубликовано 4 статьи в отечественных и зарубежных журналах и 4 тезиса в конференционном сборнике. Большая часть полученных результатов докладывалась на международной конференции «Нанофизика и наноэлектроника-2012» (г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 года).

Участником НИР (Пестовым Е. Е.) защищена (22 марта 2012 года в диссертационном совете ИФМ РАН) кандидатская диссертация на тему 'Исследование нелинейного СВЧ отклика сверхпроводников методом ближнепольной СВЧ микроскопии'. Участником НИР (Шерешевским И.А.) защищена (29 марта 2012 года в диссертационном совете ННГУ им. Н.И. Лобачевского) докторская диссертация на тему 'Операторные методы моделирования волновых процессов в низкоразмерных системах'. Двумя бывшими аспирантами (являющимися в настоящее время сотрудниками ИМФ РАН и участниками НИР, Ермолаевой О.Е. и Савиновым Д.А.) планируется представление кандидатских диссертаций в июне 2012 года и их защита в сентябре/октябре 2012 года. Участником НИР Зуевым С.Ю. планируется представление кандидатской диссертации в мае 2012 года и ее защита в сентябре 2012 года.

## Содержание

Введение.....	10
1. Изучение поперечного спин-зависимого транспорта в многослойных нанодисках, содержащих три слоя ферромагнетика, разделенных немагнитными прослойками. Изучение диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков .....	11
2. Разработка методик измерений эффектов, связанных с «топологическим» эффектом Холла, а также эффектов связанных с выпрямлением переменного электрического тока в структурах со спиральным распределением намагниченности .....	18
3. Изучение эффектов, связанных с топологическим эффектом Холла в нанодисках с вихревым распределением намагниченности .....	25
4. Анализ экспериментальных данных, полученных для гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, и сравнение их с результатами теоретических расчетов ....	28
5. Расчёт энергетически выгодной ориентации намагниченности свободно вращающейся ферромагнитной частицы над сверхпроводником и структуры стабильного вихревого состояния в сверхпроводнике .....	32
6. Изучение пространственного разрешения проекционной схемы нанолитографа в зависимости от числовой апертуры объектива и толщины фоторезиста .....	35
7. Оптимизация химического состава и изучение отечественных фоторезистов на основе ПММА .....	42
8. Создание образцов магнитных наноструктур с топологическими нормами 30 нм .....	47
Заключение.....	50
Список использованных источников.....	51
Список публикаций, тезисов выступлений на конференциях и проведенных семинаров по теме НИР .....	52



## Сокращения и обозначения

1. ВАХ – вольт-амперная характеристика
2. нм – нанометр
3. мкм – микрометр
4. МС – многослойная структура
5. ЭУФ - экстремальный ультрафиолет
6.  $T_c$  – критическая температура сверхпроводника
7.  $k_B$  – постоянная Больцмана
8.  $\hbar$  – постоянная Планка
9.  $\xi$  – сверхпроводящая длина когерентности
10.  $I_c$ - критический ток сверхпроводника
11. Э – эрстед
12. А – ампер
13. ЭУФ – экстремальный ультрафиолет

## **Введение**

В отчете представлены результаты исследований, выполненных на 5 этапе Государственного контракта № 02.740.11.0540 "Рентгенооптические и транспортные свойства металлических наноструктур" от 22 марта 2010 в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Целью работы на 5 этапе являлось создание технологических и измерительных стендов, изготовление образцов, проведение измерений, выполнение расчетов, построение теоретических моделей. Была также проведена обработка результатов измерений, сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных.

# 1. Изучение поперечного спин-зависимого транспорта в многослойных нанодисках, содержащих три слоя ферромагнетика, разделенных немагнитными прослойками. Изучение диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков.

Транспортные свойства многослойных ферромагнитных систем существенно зависят от распределения намагниченности в слоях, что является основой для их использования в новых устройствах хранения и обработки информации. Особый интерес представляют структуры с неколлинеарным распределением намагниченности, в которых спиновые и орбитальные степени свободы носителей тока взаимосвязаны. Неколлинеарные состояния могут реализовываться в многослойных ферромагнитных наночастицах за счет магнитостатического взаимодействия слоев, а устойчивость этих состояний определяется формой частиц. Рассмотрим, для простоты, три магнитных диска, разделенных диэлектрическими прослойками. Распределение намагниченности в каждом диске будем считать однородным. Магнитостатическое взаимодействие между слоями носит дальнедействующий антиферромагнитный характер и, как показано теоретически, приводит к спиральному основному состоянию системы. Такая ситуация реализуется при условии, что энергия взаимодействия между дисками много больше энергии анизотропии, связанной, например, с их формой. Для экспериментального анализа магнитного состояния многослойной частицы можно использовать зависимость ее электросопротивления от внешнего магнитного поля. Предполагая, что полевая зависимость сопротивления многослойной ферромагнитной частицы обусловлена эффектами обменной природы и пропорциональна скалярному произведению магнитных моментов слоев, имеем

$$R = R_{01} + R_{02} - R_1 \cos \theta_{12} - R_2 \cos \theta_{23}, \quad (1.1)$$

где  $\theta_{12}(\theta_{23})$  - угол между магнитными моментами первого и второго (второго и третьего) дисков,  $R_{01,02} - R_{1,2}$  - сопротивление первого (второго) туннельного контакта при параллельной ориентации магнитных моментов дисков  $\theta_{12} = \theta_{23} = 0$ . Магнитное состояние многослойных частиц можно исследовать также методом магнитно-силовой микроскопии. Однако, применение этого метода затруднено в силу доминирующего вклада верхнего магнитного слоя в измеряемый сигнал. В отличие от магнитно – силовой микроскопии, исследование магнитосопротивления многослойной частицы позволяет анализировать распределение намагниченности в глубине структуры. В этой работе представлены результаты экспериментального изучения магнитосопротивления многослойных ферромагнитных наночастиц, содержащих три магнитных слоя разделенных туннельно-прозрачными диэлектрическими прослойками, и показано, что в нулевом внешнем поле основным состоянием многослойной частицы, обладающей анизотропией типа «легкая плоскость», является спиральное состояние.

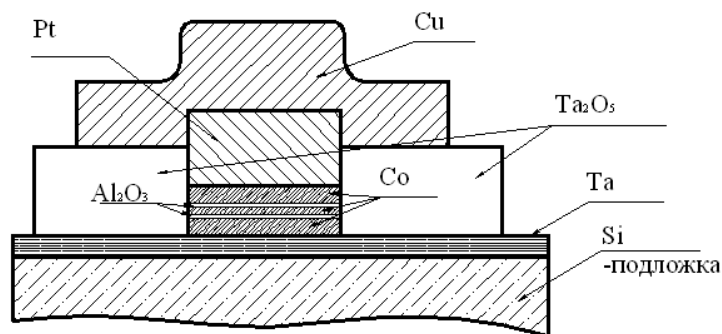


Рисунок 1. Схематическое изображение исследуемого образца.

На Рисунке 1 приведено схематическое изображение многослойной магнитной частицы, встроенной в тонкопленочную электродную систему, для подключения ее к измерительной аппаратуре. Магнитная частица формировалась из тонкопленочной структуры Co(10нм)/AlO<sub>x</sub>(2нм)/Co(5нм)/AlO<sub>x</sub>(2нм)/Co(10нм). Кобальтовые слои наносились методом магнетронного распыления в атмосфере аргона. Слои AlO<sub>x</sub> наносились магнетронным распылением алюминия с последующим плазменным окислением в атмосфере кислорода. Многослойная магнитная структура формировалась на кремниевой подложке с предварительно нанесенным слоем Ta(30нм) и покрывалась слоем Pt(50нм). Все металлические слои получены магнетронным распылением в атмосфере аргона. Маска, используемая при травлении, изготавливалась методом электронно-лучевой литографии с применением негативного электронного резиста на электронном микроскопе Supra 50 V с литографической приставкой ELPHY PLUS. Рисунок магнитной частицы формировался ионно-лучевым травлением (Ar<sup>+</sup>) тонкопленочной структуры до слоя Ta. Изоляция поверхности нижнего танталового электрода осуществлялась нанесением диэлектрической пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (50нм) методом реактивного магнетронного распыления тантала в атмосфере аргона и кислорода. Удаление слоя Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с поверхности в зоне магнитных частиц проводилось методом “lift-off”, используя остатки маски, применявшейся при травлении. Верхний медный расширенный электрод формировался методом магнетронного распыления и УФ-фотолитографии. Измерения вольтамперных характеристик и магнитосопротивления наночастиц проводились при комнатной температуре двух-контактным способом, с включением в измерительную цепь с помощью механических манипуляторов, осуществляющих прижим заостренных зондов в контактные площадки образца. Измерения проводились при пропускании тока величиной ~ 1-50 мкА, характерное сопротивление туннельных структур составляло 10 кОм.

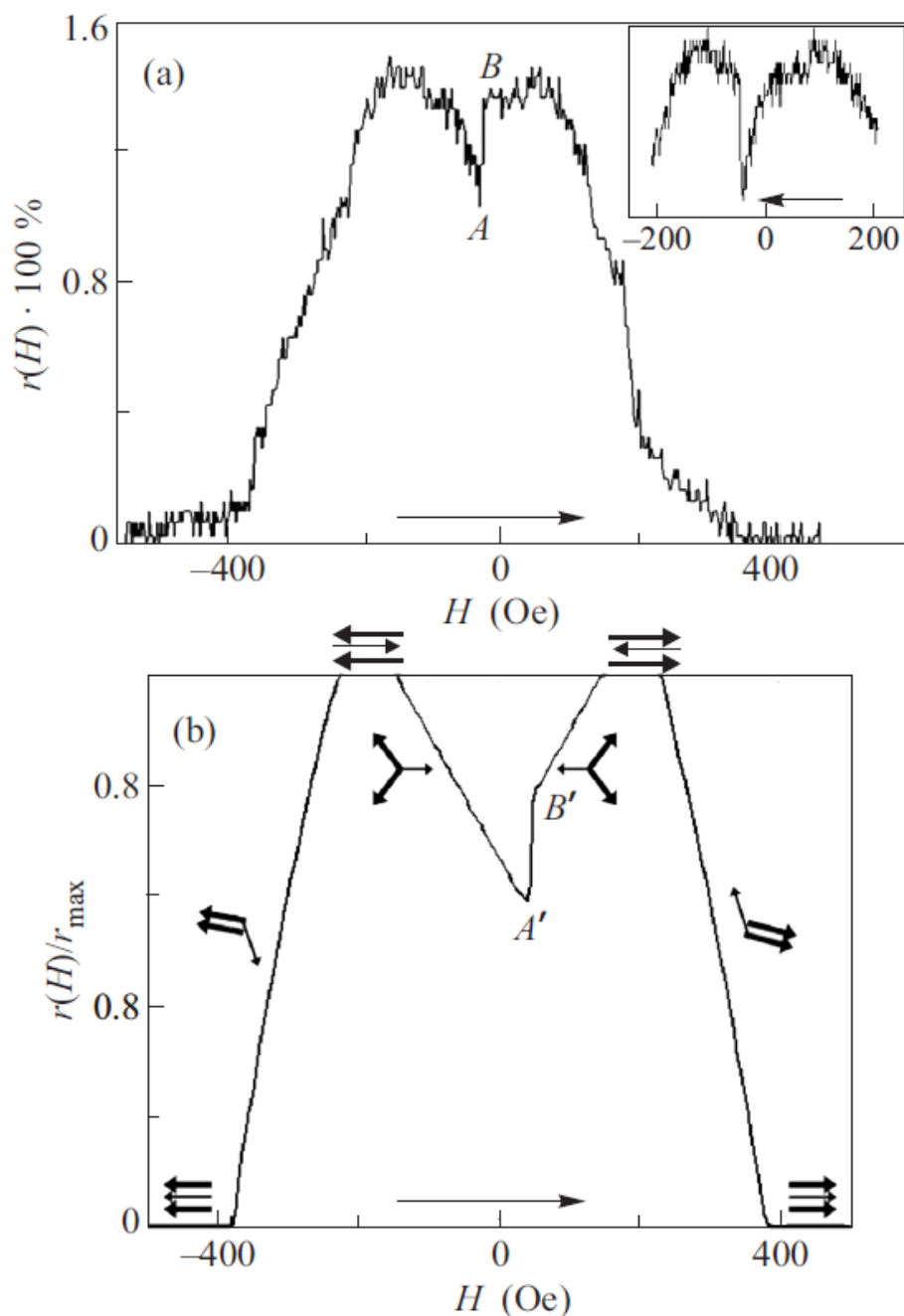


Рисунок 2. (а) Экспериментальная зависимость  $r(H)$  для круглой частицы диаметром 250 нм, толщины слоев  $Co(10\text{нм})/AlO_x(2\text{ нм})/Co(5\text{нм})/AlO_x(2\text{ нм})/Co(10\text{нм})$ . Стрелка указывает направление изменения внешнего поля. На вставке показано, что при изменении направления поля положение скачка А-В меняется. (б) Результат численного моделирования  $r(H)/r_{max}$ . Параметры моделирования: диаметр частицы 250 нм, толщины слоев  $F(10\text{ нм})/I(2\text{ нм})/F(5\text{ нм})/I(2\text{нм})/F(10\text{ нм})$ . Стрелками схематически изображены направления намагниченности слоев (среднему слою соответствует более тонкая стрелка)

На Рисунке 2а представлена экспериментальная зависимость относительного изменения сопротивления круглой (диаметр  $\sim 250\text{нм}$ ) частицы  $r(H) = (R(H) - R(H \rightarrow \infty))/R(H \rightarrow \infty)$  от

внешнего магнитного поля, направление изменения которого указано на рисунке стрелкой. Минимальным сопротивлением многослойная частица обладает при больших значениях поля  $|H| > 400 \text{ Э}$ . При малых магнитных полях  $|H| < 200 \text{ Э}$  сопротивление исследуемой системы максимально. Следует ожидать, что при больших значениях внешнего магнитного поля магнитные моменты всех дисков параллельны и, согласно формуле (1.1), сопротивление системы минимально. При уменьшении абсолютной величины магнитного поля происходит разориентация магнитных моментов слоев, что приводит к возрастанию сопротивления. Наибольший интерес представляет область малых магнитных полей. Достигнув максимума, сопротивление системы вновь убывает и в нулевом внешнем поле относительное изменение сопротивления  $r(0)$  составляет  $\sim 0.75 r_{max}$ , где  $r_{max}$  – значение  $r$  в максимуме. Изменение направления внешнего поля приводит к резкому возрастанию сопротивления (участок А-В на Рисунке 2). При дальнейшем увеличении поля сопротивление вновь достигает максимума. Такая зависимость сопротивления от внешнего магнитного поля позволяет предположить, что в нулевом внешнем поле распределение намагниченностей в слоях неколлинеарно. Пусть максимуму сопротивления соответствует коллинеарное «антиферромагнитное» распределение моментов, а в отсутствии поля реализуется симметричное неколлинеарное состояние  $\theta_{12} = \theta_{23} = \theta$ . Тогда, используя формулу (1.1) и экспериментальное значение  $r(0) = 0.75 r_{max}$ , получим  $\theta \approx 120^\circ$ .

Для уточнения сценария перемагничивания трехслойной частицы, мы провели моделирование этого процесса в рамках простой модели. Допустим, что диски однородно намагничены и взаимодействуют посредством полей рассеяния. Предположение об однородности намагничивания представляется оправданным в силу малых размеров частиц. Пренебрегая магнитной анизотропией дисков, энергию системы запишем в виде

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} e_{i,j} \bar{M}_i \bar{M}_j - \vec{H} \sum_i \bar{M}_i, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1.2)$$

Здесь  $\bar{M}_i$  – пропорциональная объему намагниченность  $i$ -ого слоя,  $e_{ij} \bar{M}_j$  – среднее магнитное поле, создаваемое  $j$ -ым диском в области расположения  $i$ -ого диска,  $e_{ij} > 0$ . Это поле для однородно намагниченного диска рассчитывалось без дополнительных предположений. Второе слагаемое есть энергия дисков во внешнем магнитном поле  $\vec{H}$ , параллельном их плоскости. Для определения магнитного состояния многослойной частицы численно решалась система релаксационных уравнений для намагниченностей слоев

$$\frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} = \alpha [\bar{M}_i \times [\bar{M}_i \times \frac{\partial E}{\partial \bar{M}_i}]] \quad (1.3)$$

На Рисунке 2б представлена рассчитанная зависимость  $r(H)/r_{\max} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{4}(\cos\theta_{12} + \cos\theta_{23})$ , которая качественно описывает экспериментальную ситуацию в предположении идентичности ( $R_1 = R_2$ ) туннельных переходов, составляющих многослойную частицу. При больших отрицательных полях магнитные моменты слоев параллельны, уменьшение величины поля приводит к развороту магнитных моментов слоев. Причем магнитные моменты крайних слоев, имеющих вдвое большую намагниченность по сравнению со средним диском, остаются параллельными. Эта угловая фаза есть результат конкуренции упорядочивающего действия внешнего магнитного поля и магнитостатического взаимодействия слоев. При дальнейшем уменьшении магнитного поля последний фактор становится доминирующим и система приходит в антиферромагнитное состояние, соответствующее максимуму сопротивления. В силу фрустрации в ориентации магнитных моментов крайних слоев, в нулевом внешнем магнитном поле многослойная частица переходит в неколлинеарное спиральное состояние. При этом угол разориентации  $\theta \approx 110^\circ$ , что близко к экспериментально найденному значению. Спиральное состояние характеризуется средней намагниченностью, направление которой совпадает с направлением внешнего поля, из которого происходило размагничивание. С этим связана особенность в поведении системы при изменении знака поля. В малых положительных магнитных полях происходит разворот спирали с резким изменением угла между магнитными моментами слоев (скачок А` - В` на Рисунке 2б). Таким образом, система характеризуется гистерезисом в расположении скачка А` - В`, который соответствует перевороту спирали при изменении знака внешнего поля. Отметим, что этот гистерезис наблюдался нами экспериментально (см. вставку на Рисунке 2а). Дальнейшее увеличение поля ведет последовательно к антиферромагнитному упорядочению (максимум сопротивления), угловой фазе и ферромагнитному состоянию системы. Для совпадения теоретической и экспериментальной зависимостей мы выбрали заниженное значение магнитного момента насыщения ферромагнитных слоев  $M_{Co} = 500$  Гс. По всей видимости, это несоответствие связано с формированием квазиоднородных состояний в частицах, влиянием на перемагничивание температурных флуктуаций и других факторов, неучтенных в модели.

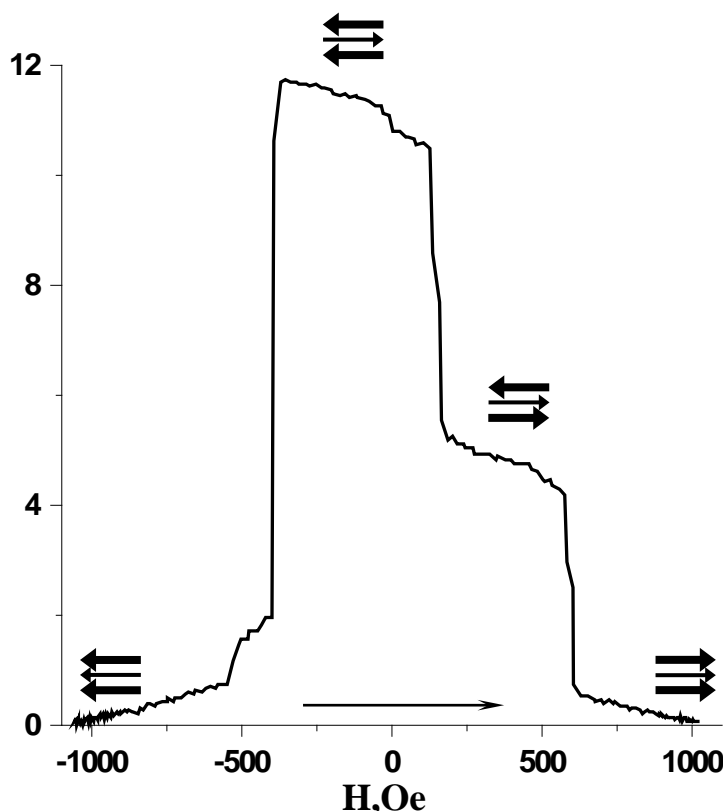


Рисунок 3. Экспериментальная зависимость  $r(H)$  для «эллиптической частицы» с латеральными размерами  $200 \times 100$  нм, толщины слоев  $CoFe(10\text{нм})/ AlO_x (2 \text{ нм})/CoFe(5\text{нм})/ AlO_x (2 \text{ нм})/CoFe(10\text{нм})$ . Магнитное поле приложено вдоль длинной оси частицы, а направление его изменения указано стрелкой.

Следует ожидать, что при увеличении анизотропии частиц угловые фазы неустойчивы и на зависимости сопротивления от магнитного поля будут наблюдаться особенности, соответствующие переходам между коллинеарными фазами. По изменению сопротивления при переходе между коллинеарными фазами можно сделать вывод о соотношении сопротивлений туннельных переходов и тем самым проверить гипотезу об идентичности двух туннельных переходов, составляющих многослойную структуру. С этой целью были изготовлены многослойные частицы, имеющие примерно те же толщины слоев, что и для первого образца, но с латеральными размерами  $100 \times 200$  нм. В качестве ферромагнитных слоев были использованы пленки  $CoFe$ , коэрцитивность которых больше коэрцитивности пленок  $Co$ , но позволяющие добиться более высоких значений  $r(H)$ . На Рисунке 3 представлена зависимость относительного изменения сопротивления этого образца от внешнего поля, приложенного вдоль длиной оси частицы. Действительно, наблюдаются скачки сопротивления, соответствующие переходам между коллинеарными состояниями, отмеченными на рисунке. Используя экспериментальные данные, получаем, что «магнито-зависимые» части сопротивлений переходов  $R_{1,2}$  (см. формулу (1.1)) отличаются не более чем на 20%. Этот эксперимент указывает, во-первых, на достаточно высокую идентичность двух последовательно соединенных туннельных переходов, составляющих



исследуемую структуру, во-вторых, на принципиальное значение анизотропии для формирования неколлинеарных состояний. Отметим, что наличие у многослойной анизотропной частицы трех устойчивых в нулевом поле состояний представляет интерес для использования подобной системы в устройствах хранения и обработки информации.

Итак, в работе экспериментально и теоретически исследовано распределение магнитных моментов в многослойной частице, состоящей из трех ферромагнитных слоев, разделенных диэлектрическими прослойками. Экспериментальные данные о магнитном состоянии системы получены путем измерения ее магнитосопротивления. Показано, что в нулевом внешнем поле многослойная частица, обладающая анизотропией типа «легкая плоскость», находится в неколлинеарном спиральном состоянии. Этот результат открывает дополнительные возможности для изучения процессов спиновой аккумуляции, перемагничивания спин-поляризованным током, нелинейных спин-зависимых транспортных явлений и эффектов близости в структурах ферромагнетик /сверхпроводник.

## **2. Разработка методик измерений эффектов, связанных с «топологическим» эффектом Холла, а также эффектов связанных с выпрямлением переменного электрического тока в структурах со спиральным распределением намагниченности.**

### *2.1. Методика создания подводящих контактов к крестообразным наночастицам для проведения измерений топологического эффекта Холла.*

Одной из возможностей реализации систем с неоднородным распределением намагниченности является создание однослойных наночастиц сложной формы. Например, при определенных размерах в наночастицах круглой и цилиндрической формы возникают магнитные вихри. В рамках данного проекта, на первом этапе, было продемонстрировано, что в частицах крестообразной формы могут возникать магнитные антивихри. Интерес к структурам с такими распределениями намагниченности обусловлен возможностью наблюдения в них новых транспортных явлений, в частности, «топологического» эффекта Холла, экспериментальное обнаружение которого является одной из задач данного проекта. Для проведения транспортных измерений необходимо подвести к магнитным наночастицам токовые шины. Сложность проблемы состоит в том, что для измерения эффекта Холла необходимо подвести четыре контакта к частице малого размера, при этом сопротивление контактов между частицей и токоведущими проводниками должно быть малым по сравнению с сопротивлением самой частицы. Крестообразные частицы являются более подходящими для подведения к ним контактов, поэтому в рамках данного проекта именно они были выбраны в качестве систем для исследования «топологического» эффекта Холла. На данном этапе работ была разработана методика сопряжения крестообразных ферромагнитных наночастиц с токовыми шинами.

Необходимость подключения двух и более контактов к субмикронным объектам определяет выбор способа формирования рисунка тонкопленочных слоев. Изготовление магнитных элементов проводилось ионно-лучевым травлением ( $Ar^+$ ) структуры Co-Si, нанесенной на сапфировую подложку, в маске из слоя ванадия. Рисунок слоя ванадия формировался взрывной литографией с использованием контактной маски электронного резиста ПММА 950 К. Экспонирование проводилось на электронном микроскопе SUPRA 50 VP.

Все тонкопленочные слои наносились методом магнетронного распыления в атмосфере аргона. Толщины слоев Co, Si и V выбирались так, чтобы при травлении структуры Co-Si полностью расходовался слой ванадия.

Технологическая схема изготовления магнитных элементов приведена на Рисунке 4 а-д.

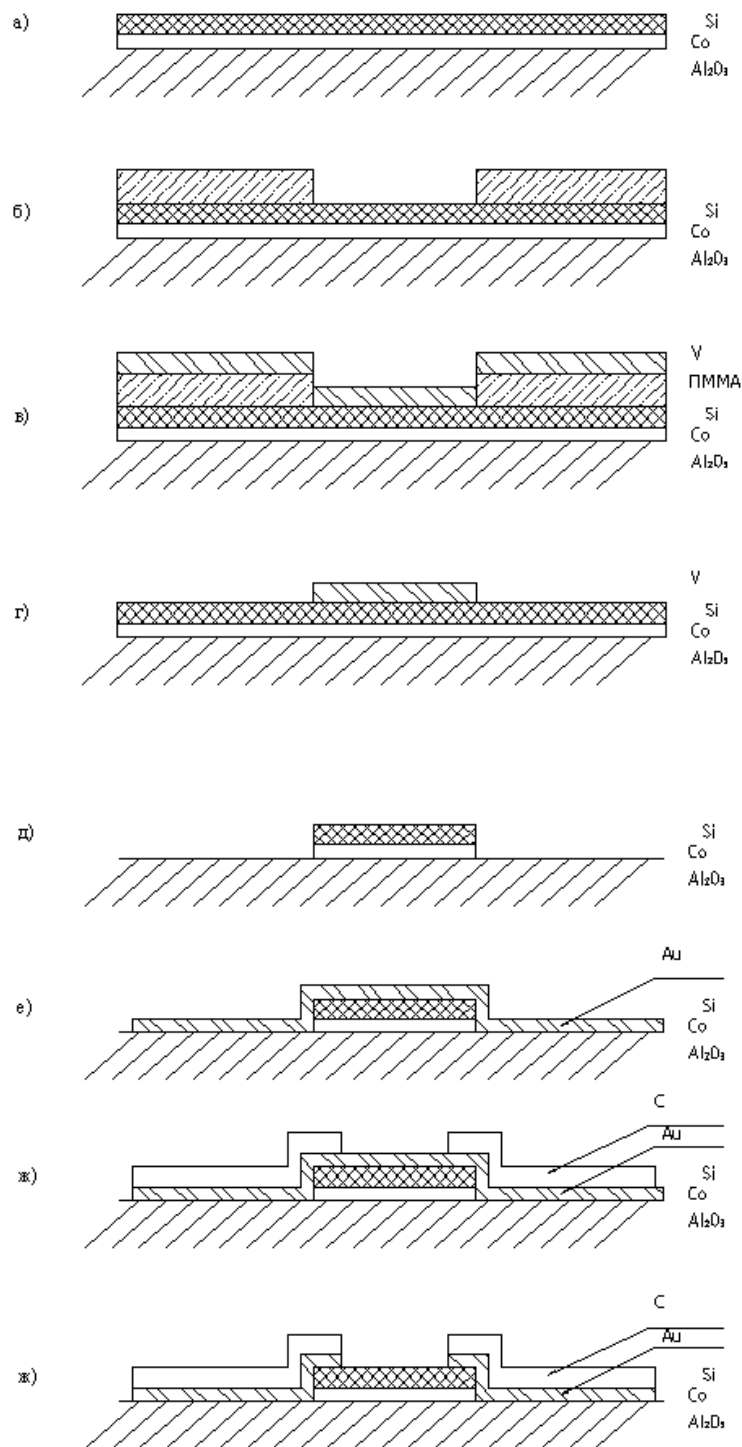


Рисунок 4. Технологическая схема изготовления магнитных элементов, включенных в контактную систему.

При таком способе формирования получаются изолированные по поверхности слоем аморфного кремния магнитные элементы металлическим выходом на границе рисунка. Электрический контакт магнитного элемента с немагнитным контактным слоем обеспечивается нанесением пленки Au магнетронным распылением. Толщина Au должна быть близка к толщине

пленки Co (рисунок 4е). Далее методом FIB CVD на установке NEON 40 формируется углеродная маска и проводится ионно-лучевое травление золотой пленки (Рисунки 4 ж-з). При этом, закрытые по поверхности кремнием, магнитные элементы не подвергаются ионной бомбардировке.

В области перекрытия контактным материалом части магнитных элементов не шунтируются немагнитным металлом. Контакт формируется на границе рисунка.

Способом, описанным выше, была изготовлена структура, АСМ образ которой приведен на рисунок 5.

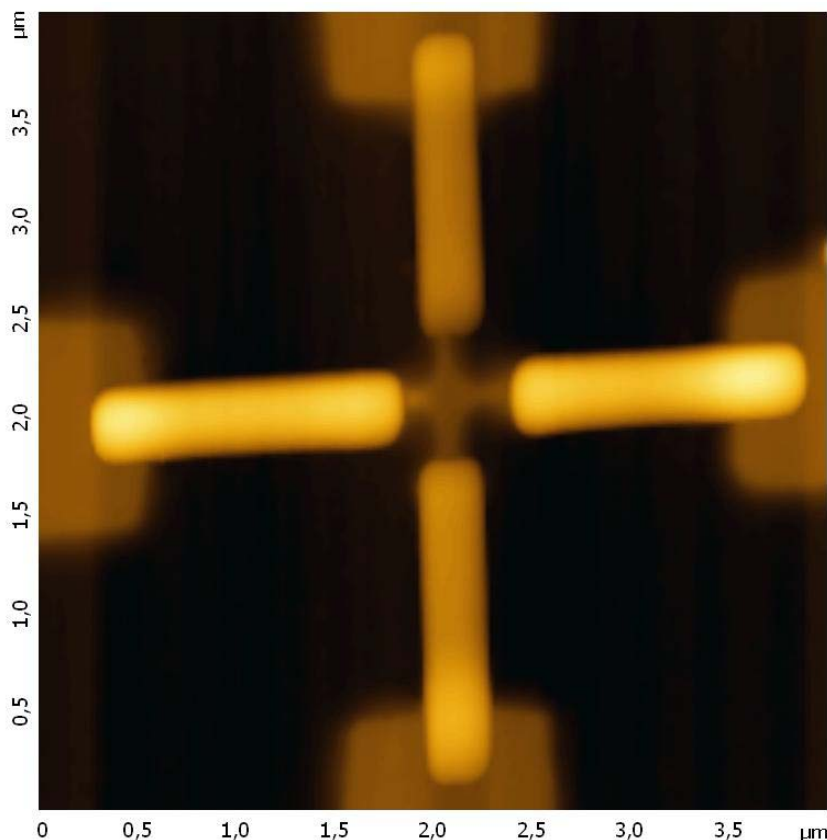


Рисунок 5. АСМ изображение крестообразной частицы с подведенными к ней контактами.

## 2.2. Методика формирования многослойных магнитных структур с подводными контактами для проведения транспортных измерений.

В настоящее время большой интерес исследователей вызывают наноструктуры, в которых тонкие (несколько нанометров) слои ферромагнитных металлов разделены прослойками (несколько нанометров) немагнитных материалов. Наличие немагнитных прослоек малой толщины позволяет создавать структуры с неоднородным распределением намагниченности, при этом степень неоднородности крайне велика (намагниченность изменяется на масштабах порядка нескольких нанометров, тогда как в “классических” доменных границах это десятки и сотни нанометров). Создание латерально-ограниченных структур открывает новые возможности по

управлению их магнитным состоянием. Высокая степень неоднородности приводит к возможности наблюдения новых транспортных явлений. Кроме достаточно хорошо изученных явлений гигантского и туннельного магнитосопротивления, в таких системах возникает ряд новых интересных явлений, таких как перемагничивание током, и др. В рамках данного проекта запланировано исследование особенностей транспортных явлений в латерально-ограниченных магнитных наноструктурах. Таким образом, разработка методики изготовления многослойных латерально-ограниченных ферромагнитных наночастиц и сопряжение их с токовыми шинами для проведения транспортных измерений занимает одно из центральных мест в рамках данного проекта.

Магнитные наноструктуры формировались методом электронно-лучевой литографии с применением позитивных и негативных резистов, промежуточных масок из многослойных металлических пленок (V, Cr, Ti, Cu, Sc, Al) в комбинации с последующим их плазмохимическим и ионным травлением. При оптимизации процедур электронно-лучевой литографии для изготовления больших (общим размером до  $0.5 \times 0.5$  мм) массивов магнитных частиц с линейными размерами  $\geq 100$  нм применялся позитивный резист ПММА (как коммерчески доступный производимый фирмой Microchem, так и синтезированный в институте химии ННГУ) с использованием lift-off методики. Для формирования магнитных частиц меньшего размера и частиц из многослойных пленок предпочтение было отдано высоко-разрешающим негативным электронным резистам. При этом были изучены особенности применения нескольких типов доступных нам негативных резистов: коммерческий ma-N 2403, материалы отечественного производства на основе фенолальдегидных смол ФП 9120 и ФП 051 (которые широко применяются в фотолитографии ультра-фиолетового диапазона длин волн) и фуллерены. В первую очередь при оптимизации литографических процедур было проведено экспериментальное тестирование электронных резистов.

Формирование структур для транспортных измерений. Электронная литография является одним из самых распространенных методов создания латерально ограниченных наноструктур. С помощью электронного пучка в электронном резисте возможно формировать рисунки сложной формы - эллипсы, полосы, кресты, треугольники и другие геометрические фигуры. При передаче рисунка в многослойную пленку, содержащую магнитные металлы (магнитный материал) возникают нижеследующие проблемы.

Для стандартных ферромагнетиков переходных металлов, таких как кобальт, никель, железо (и сплавом на их основе) существует проблема переноса рисунка из резиста в материал. Дело в том, что не существует химических реакций для проведения плазмо-химического травления, с использованием газов в которых избирательно травился бы ферромагнетик. Т.е. рисунок в ферромагнитный материал можно передать только при использовании ионного

травления в аргоне. Но электронные резисты, имеющие в основе полимер, не стойкие к такому травлению и быстро расходуются. При оптимальной литографической технологии толщина резиста должна не превышать латеральных размеров изготавливаемых наноструктур. В связи с этим, необходимо использовать дополнительные слои в маске (так называемые буферные слои) для передачи рисунка. Введение дополнительных слоев, в конечном итоге приводит к увеличению размеров изготовленных структур при «сухом» травлении по сравнению с рисунком в резисте. Подбор цикла процессов травления, подбор резистов и их комбинации, чтобы подобное разрастание латеральных размеров от слоя к слою было минимальным, является трудоемкой и сложной задачей.

Еще одной проблемой является то, что остаточные магнитное состояние в латеральной структуре сильно зависят от дефектов формы. Характерный масштаб в магнетиках является 10-20 нм. Появление даже такого дефекта на границе может привести к пиннингу намагниченности на дефекте и возможно возникновение нового устойчивого состояния (пусть и не основного). Подбирая форму, латеральные размеры формируемой частицы можно свести влияние дефектов границ к минимуму, но удается это не всегда. Развитие подобных дефектов начинается с того, что даже лучшие электронные резисты на основе полимеров имеют разрешение порядка 10-30 нм. Если неправильно подобрать процессы травления, то эти дефекты могут развиваться, например, в следствие переосаждения материала металлических пленок при плазмохимическом травлении.

Таким образом, основные усилия при этих исследованиях были направлены на разработку многослойного резиста для электронной литографии, позволяющие сформировать многослойную частицу с размерами до 100\*200 нм и возможностью подведения к ней электрических контактов для транспортных измерений.

Одним из первых шагов был выбор правильного металла для электрических контактов. Рассматривалось два варианта: Au и Pt. Было экспериментально установлено, что при формировании частицы из многослойной маски, материал Au активно перераспыляется. Это ведет к увеличению планарной формы частицы при переносе рисунка из верхнего слоя электронного резиста к металлическому. Фактически минимальный размер, полученный с использованием Au, в качестве проводящего слоя над верхним слоем ферромагнетика составлял 300\*500 нм. С использованием Pt в качестве проводящего слоя этот размер удалось снизить до 100\*200 нм. Также для создания частиц с подобными латеральными размерами потребовалось заменить стандартный резист ФП-9102 (на основе фенол-альдегидных смол) на резист с более высоким разрешением ma-N 2401 и ma-N 2403, производства Германии. Это также потребовало затрат на подбор режимов работы с этими резистами, включая определение дозы засветки на электронном литографе, способов проявления и т.п.

Также первоначально в качестве нижнего электрода была использована многослойная структура [Ta/Au]\*5. Использование подобной многослойной структуры (а не чистого Au) было необходимо, т.к. при аргоновом травлении ферромагнитных пленок, в слое Au очень быстро развивалась шероховатость поверхности. При замене мишени магнетрона с Au на Pt в качестве нижнего слоя стал формироваться слой Ta/Pt/Ta. Нижний слой тантала обеспечивает высокую адгезию структуры к подложке кремния, слой Pt - достаточную проводимость. Но т.к. материал Pt имеет большой коэффициент распыления в аргоне был добавлен стоп слой для аргонового травления – верхний слой Ta в этом трехслойном электроде. Т.к. материал Pt использовался впервые на данной установке, потребовалось затрата усилий на его освоение в качестве используемого материала.

В ходе отработки процесса получения многослойных магниторезистивных элементов были также изучены особенности получения туннельного барьера с использованием оксида тантала.

Разработанную и оптимизированную методику изготовления магниторезистивного элемента можно описать следующим образом: на проводящем подслое Ta/Pt/Ta формируются частицы из пленочной многослойной ферромагнитной структуры Co/TaO<sub>x</sub>/Co/Pt ионным травлением в атмосфере аргона в сложной комбинированной маске с использованием негативного электронного резиста, определяющего форму частиц. Диэлектрическая прослойка формировалась естественным окислением тонкой пленки Ta, с помощью напуска атмосферы в камеру. Для возможности хорошего контакта верхний магнитный слой частицы покрыт Pt. Затем весь образец покрывался слоем диэлектрика Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, который впоследствии удаляется с вершущек многослойных металлических частиц в результате lift-off процедуры («взрыв») оставшейся после ионного травления маски из электронного резиста. Таким образом, двухслойные ферромагнитные частицы оказываются помещенными в диэлектрическую матрицу, и верхний слой Pt у частиц имеет выход на поверхность. Далее было проведено последовательное расширение контактных площадок с субмикронных размеров до 400 микрон с помощью фотолитографии.

Используя описанную выше методику были изготовлены частицы с двумя и тремя магнитными слоями (см. Рисунки 6 и 7) разделенными двумя диэлектрическими прослойками. Данные частицы имели эллиптическую форму и размеры (200 нм x 400 нм).

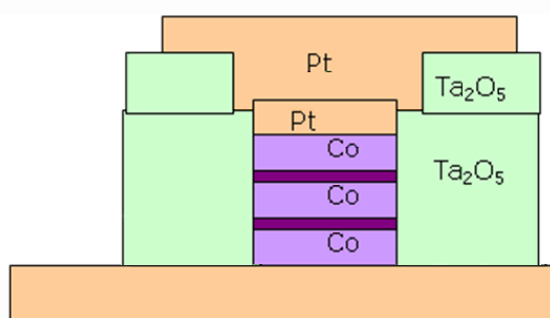


Рисунок 6. Частица с тремя магнитными слоями, разделенными диэлектрическими прослойками.

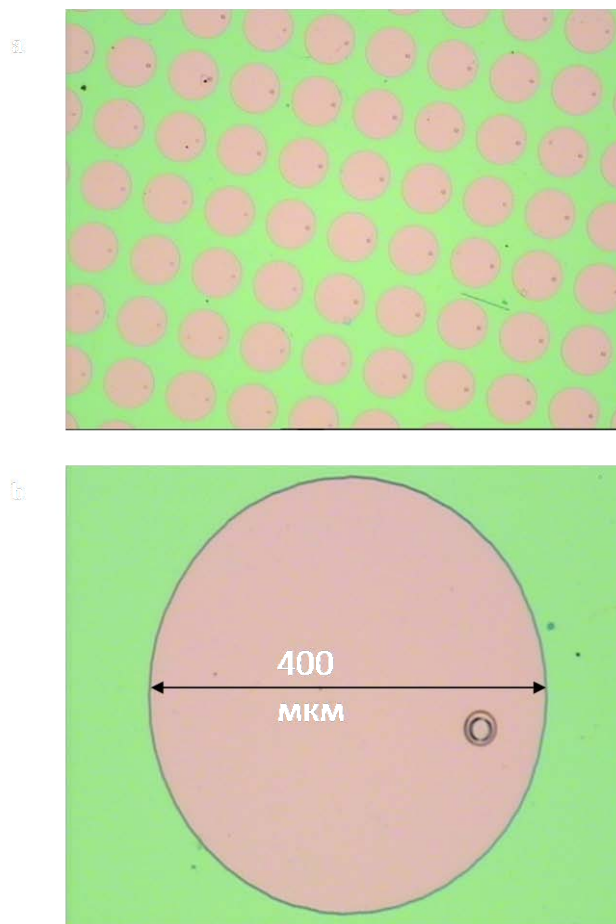


Рисунок 7. Изображение (а) решетки контактных площадок над многослойными магниторезистивными элементами; (b). Изображение одного магниторезистивного элемента с верхней контактной площадкой

Таким образом, была разработана методика изготовления латерально-ограниченных, состоящих из нескольких слоев ферромагнитного металла, разделенных диэлектрическим туннельным барьером. При этом толщина частиц составляет несколько десятков нанометров, а латеральные размеры несколько сотен нанометром. Также разработана методика сопряжения магнитных наноструктур с токовыми шинами. На основе разработанных методик созданы массивы магнитных наночастиц эллиптической формы, состоящих из двух и трех слоев ферромагнитного металла (Co, толщиной 15 нм), разделенных прослойками изолятора (TaO, толщиной 2 нм). Латеральные размеры частиц (200 нм x 400 нм). Для каждой отдельной частицы создана контактная площадка, используя которую можно проводить транспортные измерения.



### **3. Изучение эффектов, связанных с топологическим эффектом Холла в нанодисках с вихревым распределением намагниченности.**

#### *3.1. Магнитные свойства крестообразных магнитных частиц*

В настоящее время существует повышенный интерес к магнитным наноструктурам, обусловленный возможностью их использования в спиновой электронике. Одной из наиболее важных задач в этой области является создание структур с заданным и контролируемым распределением намагниченности. Одним из определяющих распределение намагниченности факторов, является форма и размер наночастицы. Ранее (на предыдущем этапе работ по данному проекту) нами было продемонстрировано, что в наночастицах крестообразной формы могут реализовываться антивихревое распределение намагниченности. Антивихревое распределение намагниченности представляет интерес как с точки зрения микромагнетизма, так и с точки зрения транспортных явлений в магнетиках. С одной стороны это экзотическое распределение намагниченности, которое трудно реализовать (в работе антивихревое распределение было получено в системе четырех пересекающихся колец совместно с вихревыми распределениями), а с другой стороны в частицах с антивихревым распределением намагниченности может возникать новое транспортное явления – “топологический” эффект Холла. Для исследования этого транспортного явления более подходящими являются именно крестообразные частицы, т.к. для них проще реализовать сопряжение с токовыми шинами. Существование подобного распределения отдельно от магнитного вихря было продемонстрировано нами впервые в мире. Реализация антивихревого состояния требует специальной формы частицы и специальной методики ее намагничивания, которая и была разработана в рамках данного проекта (на первом этапе). Предложенная методика была основана на последовательном воздействии на массив частиц однородного поля различного направления. В итоге весь массив переходил в состояние с магнитным антивихрем. Большой интерес представляет, однако, переключение в антивихревое состояние отдельных частиц. В рамках второго этапа данного проекта разработана такая методика. В ее основе лежит воздействие на магнитную частицу неоднородным полем зонда.

Для реализации анти-вихревого состояния нами были предложены и изготовлены крестообразные частицы несимметричной формы, у которых два сектора имели заострения на концах, повышающие коэрцитивность, а два другие имели утолщения, понижающие коэрцитивность.

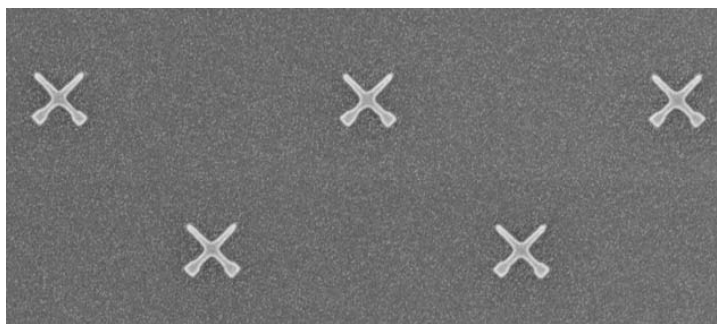


Рисунок 8. Массив частиц крестообразной формы.

Латеральные размеры составляли  $a = 1$  мкм,  $b = 100$  нм, ширина части с утолщением – 150 нм, толщина частицы - 40 нм. Анти-вихревое состояние реализовывалось в таких частицах в процессе перемагничивания во внешнем однородном поле за счет различной коэрцитивности секторов креста.

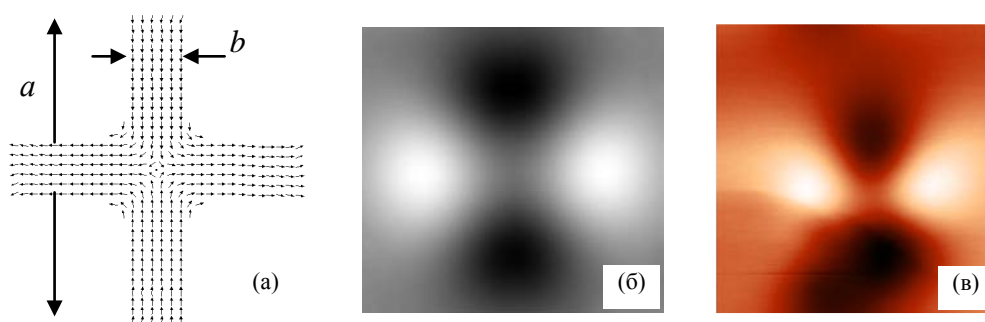


Рисунок 9. Анти-вихревое состояние в крестообразной частице. (а) – модельное распределение намагниченности. (б) – модельное распределение МСМ контраста. (в) – экспериментальное МСМ изображение несимметричного креста с латеральными размерами  $a = 1$  мкм,  $b = 100$  нм ( $g = 10$ ). Толщина частицы 40 нм.

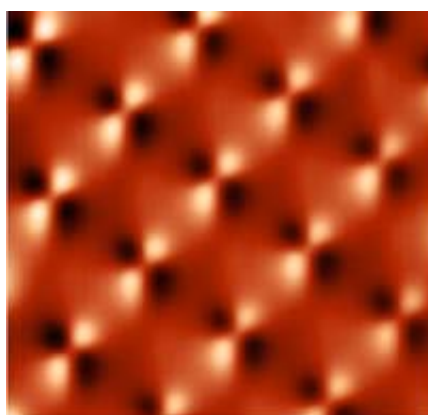


Рисунок 10. МСМ изображение массива крестов в анти-вихревом состоянии.

### 3.2. Транспортные измерения в крестообразных частицах

Для проведения транспортных измерений необходимо подвести к магнитным наночастицам токовые шины. Сложность проблемы состоит в том, что для измерения эффекта Холла

необходимо подвести четыре контакта к частице малого размера, при этом сопротивление контактов между частицей и токоведущими проводами должно быть малым по сравнению с сопротивлением самой частицы. Крестообразные частицы являются более подходящими для подведения к ним контактов, поэтому в рамках данного проекта именно они были выбраны в качестве систем для исследования “топологического” эффекта Холла.

Были проведены измерения электрических свойств крестообразной частицы. АСМ изображение такой частицы с подведенными контактами представлено на Рисунке 8. На Рисунке 9 представлены МСМ изображение крестообразных частиц. Измерения показали, что удельное сопротивление контакта не превышает  $10^{-8}$  Ом\*см<sup>2</sup>. Данное сопротивление соответствует теоретическим оценкам сопротивления кобальтовой полоски соответствующих размеров. Таким образом, сопротивление контактов между золотыми токоведущими шинами и наночастицей является малым по сравнению с сопротивлением самой частицы и возможны измерения особенностей транспортных свойств таких частиц.

Проведение измерений “топологического” эффекта Холла встретило ряд сложностей, основной из которых является высокая чувствительность наночастиц к скачкам напряжения, возникающим при включении частицы в измерительную цепь. Из-за малого размера частицы имеют малое сопротивление, что приводит к разрушению частиц при скачках напряжения. Для проведения измерений особенностей транспортных свойств металлических наночастиц с малым сопротивлением требуется провести дополнительные исследования, направленные на развитие методики измерения электрических характеристик. Данные исследования предполагается провести в рамках третьего этапа данного проекта.

Таким образом, на данном этапе проекта была разработана методика сопряжения однослойных наночастиц крестообразной формы с токоведущими проводами. На основе этой методики была создана система, состоящая из крестообразной частицы с размерами порядка 200 нанометров с подведенными к ней токоведущими проводами. Продемонстрировано, что сопротивление контактов между частицей и токовыми шинами мало по сравнению с сопротивлением самой частицы, что позволяет говорить о возможности исследования “топологического” эффекта.

#### 4. Анализ экспериментальных данных, полученных для гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, и сравнение их с результатами теоретических расчетов.

На третьем этапе проекта были выполнены измерения критического тока для планарной гибридной структуры «сверхпроводник-ферромагнетик», состоящей из тонкой сверхпроводящей Al пленки и объемного ферромагнитного кристалла  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с одномерной доменной структурой. В данном разделе мы сравним экспериментальные результаты с результатами теоретического моделирования и, тем самым, объясним происхождение наблюдаемой асимметрии вольт-амперных характеристик (диодного эффекта).

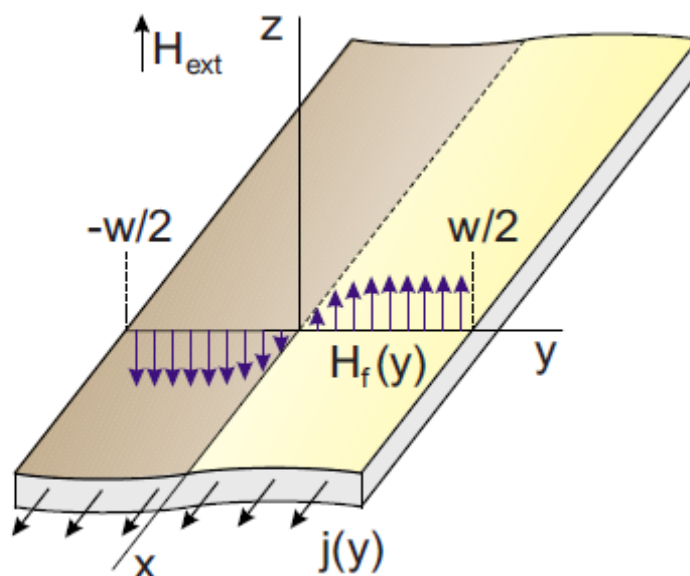


Рисунок 11. Модельная геометрия. Ток направлен вдоль оси  $x$ ,  $H_f$  – магнитное поле индуцированное доменной стенкой.

Для того чтобы понять физическую причину различия между токами  $I_c^+$  (критический ток, когда ток направлен вдоль оси  $x$  – см. Рисунок 11) и  $I_c^-$  (критический ток, когда ток направлен против оси  $x$  – см. Рисунок 1) мы проанализировали транспортные свойства гибридной структуры сверхпроводник/ферромагнетик в рамках модели Лондонов. Мы рассмотрели тонкий сверхпроводящий мостик ширины  $w$  в поле, создаваемой одиночной прямолинейной доменной стенкой, находящейся в центре мостика при  $y=0$  направленной параллельно оси  $x$  (см. Рисунок 11). В модели мы предположили, что все параметры (ток, распределение вихрей в сверхпроводнике) зависят только от поперечной координаты  $y$ . В результате, распределение тока  $j(y)$  и плотности вихрей  $n(y)$  может быть найдено из решения уравнения Максвелла-Лондона

$$\frac{4\pi\lambda^2}{c} \frac{dj}{dy} = H_{\text{ext}} + H_f + B_I - \Phi_0 n(y), \quad B_I = \frac{d}{c} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{j(y') dy'}{y - y'}$$

где  $H_f = H_0 \arctan(y/L)$  – поле, индуцированное доменной стенкой,  $B_I$  – поле, индуцированное сверхпроводящими токами,  $\lambda$  – Лондоновская глубина проникновения,  $d$  – толщина сверхпроводящей пленки,  $H_{ext}$  – внешнее магнитное поле и  $\Phi_0 = hc/2e$  – квант магнитного потока. Для того чтобы определить критический ток сверхпроводника, соответствующий переходу из состояния с покоящимися вихрями к состоянию с движущимися вихрями, мы использовали следующие условия:

1) Максимальное значение плотности тока  $j$  в области свободной от вихрей должно быть равно критическому значению  $j_s$ , которое определяет пороговое значение для рождения вихрей/антивихрей внутри сверхпроводника или на его краю

2) Для того, чтобы обеспечить свободное течение вихрей при  $I = I_c$ , локальная плотность тока  $j$  должна быть равна плотности тока депининга  $j_p$  в области где  $n(y) \neq 0$ , ( $j_p = j_{p0}/(1 + |B_z|/B_p)$  в модели Кима-Андерсона) и  $B_z = H_{ext} + H_f + B_I$  локальное магнитное поле. В результате, в области свободной от вихрей,  $n(y) = 0$ , плотность тока может быть больше чем  $j_p$ .

3) Посчитанное распределение  $j(y)$ , которое удовлетворяет условиям 1-2, позволяет определить

$$I_c = d \int_0^w j(y) dy .$$

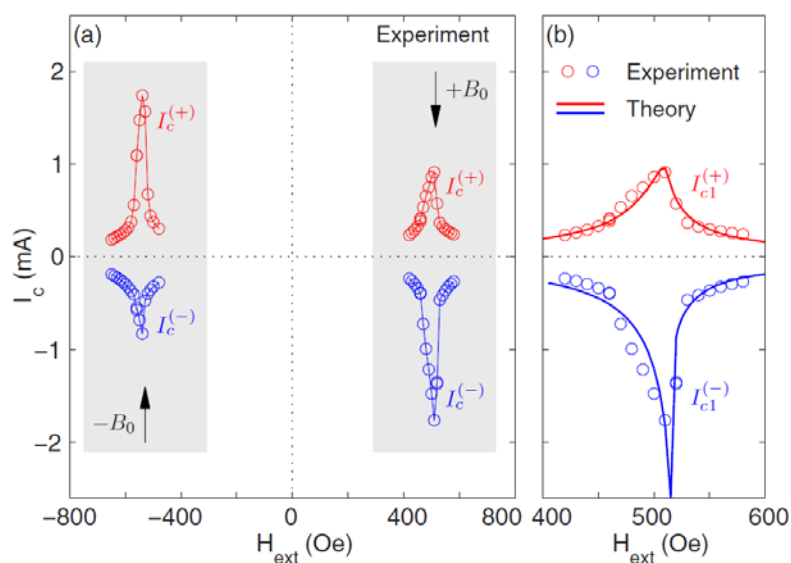


Рисунок 12. (а) Экспериментально измеренные для двухслойной гибридной структуры Al/VaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> критические токи  $I_c^{(+)}$  и  $I_c^{(-)}$  как функции приложенного магнитного поля  $H_{ext}$  при температуре  $T=0.5$  К. Заштрихованные области соответствуют диапазону  $H_{ext}$ , при котором наблюдается формирование компенсированной сверхпроводимости, т.е. уменьшение сопротивления при изменении поля. Стрелки указывают поле компенсации  $B_0$ , определяемое по

положению минимума магнитосопротивления и соответствующее максимуму «встроенного» неоднородного магнитного поля, индуцированного ферромагнетиком.

(b) Сравнение теории (сплошные линии) и эксперимента (символы) для зависимостей  $I_c^{(+)}(H_{ext})$  и  $I_c^{(-)}(H_{ext})$ .

В наших вычислениях мы использовали параметры, типичные для системы опубликованной в [1]:  $w=30$  мкм,  $d=50$  нм,  $\lambda=150$  нм,  $B_0=520$  Э,  $B_p=30$  Э,  $H_0=331$  Э,  $j_{p0}=0.14 j_{dep}$ ,  $j_s=0.55 j_{dep}$ , где  $j_{dep}$  плотность тока распаривания при низких температурах. Выбор значения параметра  $L=0.35$  мкм определяется тем обстоятельством, что ширина области, где магнитное поле доменной стенки меняет знак, может быть значительно меньше внутри сверхпроводящей пленки, находящейся на расстоянии  $h=50$  нм, чем на расстоянии  $h=400$  нм измеренной в эксперименте. Так как существует хорошее согласие между экспериментальными результатами и теоретически посчитанными зависимостями  $I_c(H_{ext})$  (см. Рисунок 12) мы интерпретируем обнаруженную асимметрию следующим образом.

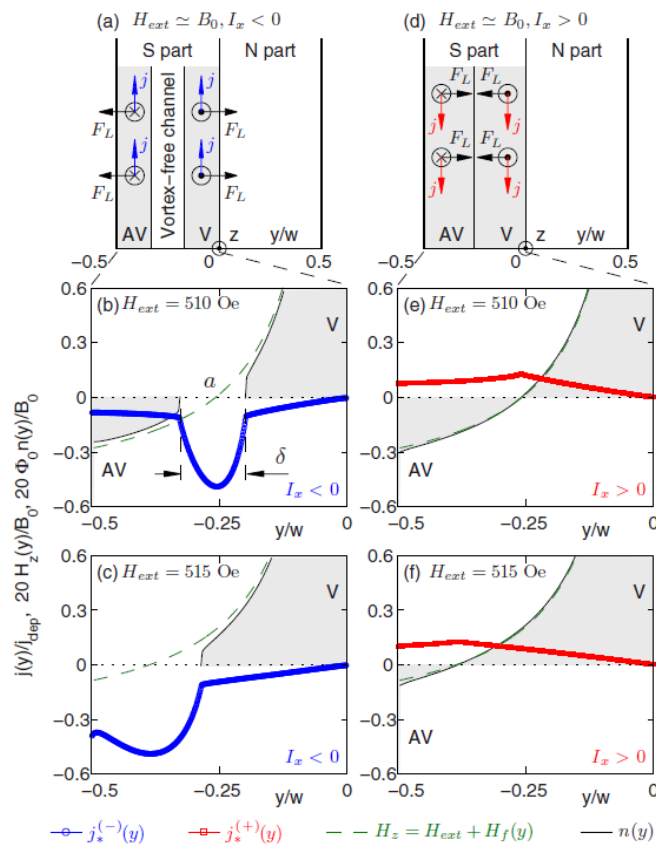


Рисунок 13. Формирование вихревой структуры для  $I_x < 0$ , для расчетов использовалось поле вида  $H_f = H_0 \arctan(y/L)$ . Значения полного инжектируемого тока  $I_x$  и приложенного поля  $H_{ext}$  указаны на рисунках.

При условии  $H_{ext} \approx B_0$  результирующее магнитное поле оказывается эффективно компенсированным в левой части мостика, в то время как правая часть мостика оказывается в нормальном состоянии (Рисунок 13). Поскольку локальное поле  $H_z = H_{ext} + H_f$  меняет знак внутри сверхпроводящей области (в случае  $H_{ext} < B_0$ ), устойчивая вихревая структура в общем случае состоит из вихрей и антивихрей. Однако сила Лоренца, действующая на вихри, зависит от направления транспортного тока, поэтому возникающие вихревые структуры будут зависеть от знака протекающего тока  $I_x$ . В самом деле, инжекция отрицательного тока ( $I_x < 0$ ) будет вынуждать вихри двигаться направо, а антивихри – налево, приводя к формированию безвихревого канала в центральной части сверхпроводящей области. Точное положение канала и его ширина будут очевидным образом зависеть от  $H_{ext}$ . Благодаря наличию безвихревой области, существует возможность пропустить дополнительный значительный ток без диссипации энергии порядка  $\delta \times (j_s - j_p)$ . Для тока обратной полярности ( $I_x > 0$ ) указанная безвихревая область исчезает, поскольку вихри и антивихри будут двигаться навстречу друг другу и аннигилируются в некоторой точке. Как следствие, плотность сверхпроводящего тока нигде внутри сверхпроводящей области не может превышать плотность тока депиннинга и  $I_c^{(+)} < I_c^{(-)}$ . В недокомпенсированном случае ( $|H_{ext}| < B_0$ ) возникающая безвихревая область из-за значительного градиента поля слишком узка для того, чтобы индуцировать асимметрию вольт-амперных характеристик и наблюдаемый диодный эффект. В перекомпенсированном случае ( $|H_{ext}| > B_0$ ) безвихревой канал становится очень узким и возникает на краю образца. Поэтому его роль не оказывает существенного влияния на вольт-амперные характеристики. При смене знака внешнего поля мы имеем такую же физику с той лишь разницей, что избыточный ток соответствует положительному току и  $I_c^{(+)} > I_c^{(-)}$ . Все результаты расчетов находятся в качественном и количественном согласии с экспериментом (Рисунок 12).

## 5. Расчёт энергетически выгодной ориентации намагниченности свободно вращающейся ферромагнитной частицы над сверхпроводником и структуры стабильного вихревого состояния в сверхпроводнике

В рамках проекта теоретически рассмотрена задача об энергетически выгодном состоянии системы сверхпроводящая плёнка с вихрём и магнито-мягкая частица (см. Рисунок 14). Ферромагнитная частица описывается как магнитный диполь с моментом  $M$ , расположенный на высоте  $h$  над сверхпроводящей плёнкой, в которой находится вихрь.

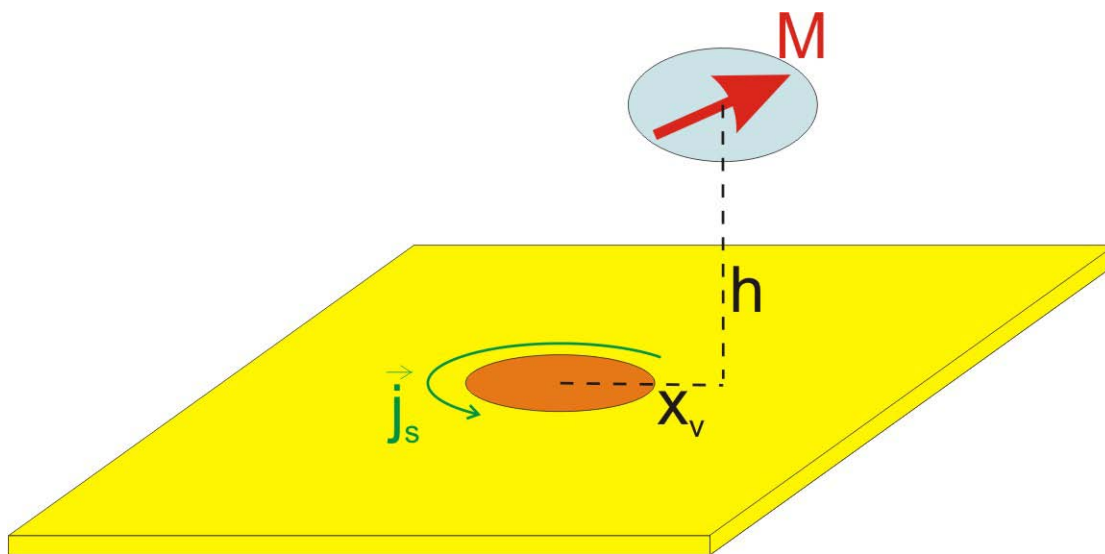


Рисунок 14. Магнитный диполь с моментом  $M$ , находящийся на высоте  $h$  над сверхпроводящей плёнкой, и вихрь в сверхпроводящей плёнке, положение которого задаётся координатой  $x_v$ .

Сверхпроводящая и ферромагнитная подсистемы взаимодействуют через поля рассеяния: поле, создаваемое диполем определяет положение вихря, тогда как, токи, текущие вокруг вихря, создают магнитное поле, определяющее ориентацию магнитного момента диполя. Ориентация диполя также определяется и магнитной анизотропией частицы, описываемой в рамках задачи простейшим выражением для соответствующего вклада в энергию:  $F_{an} = \kappa M^2 \sin^2 \theta_0$ . Сверхпроводящая подсистема описывается в рамках теории Гинзбурга-Ландау функционалом свободной энергии  $F_s$ . Энергетически выгодное состояние магнитной подсистемы (угол ориентации диполя  $\theta_0$ ) и сверхпроводящей подсистемы (координата вихря  $x_v$ ) определяются минимизацией полной свободной энергии системы  $F = F_{an} + F_s + F_H$  (здесь  $F_H$  – энергия полей рассеяния) относительно  $\theta_0$  и  $x_v$ . Зависимость  $\theta_0$  от параметра анизотропии  $\kappa$  представлена на Рисунке 15.



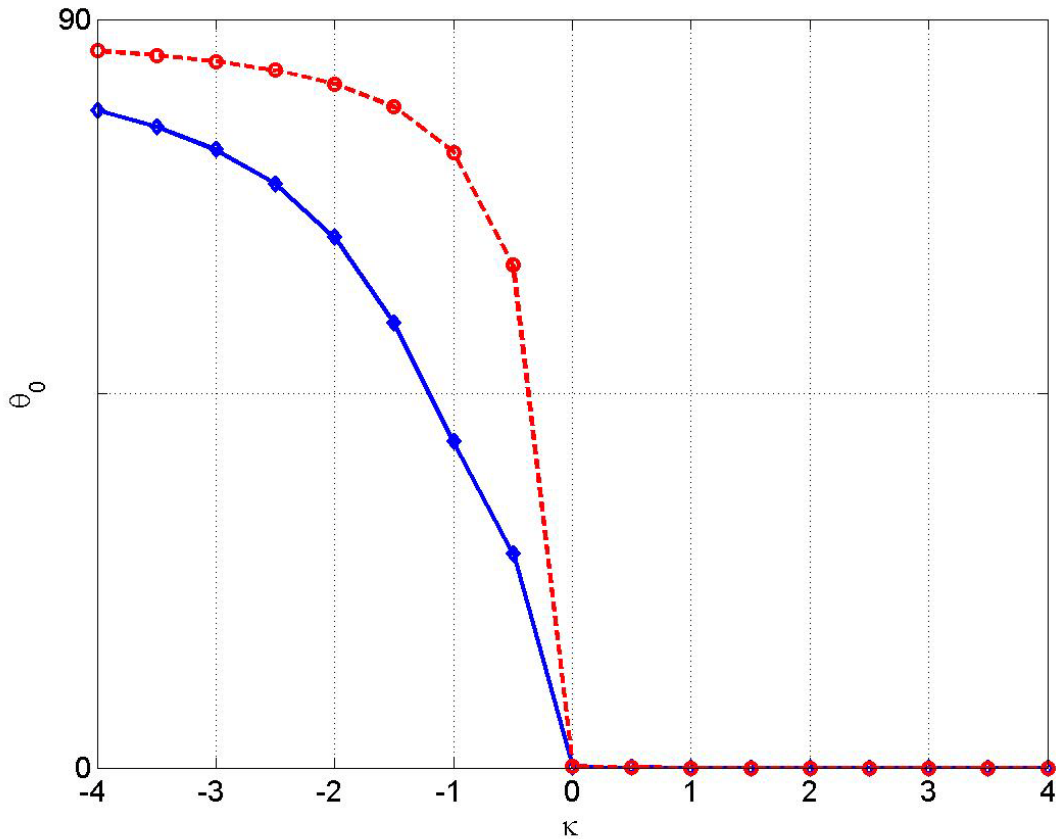


Рисунок 15. Зависимость угла отклонения  $\theta_0$  магнитного дипольного момента  $\mathbf{M}$  частицы  $[M=2H_{c2}(T)\xi^3(T)]$  от вертикали (в градусах) для различных значений параметра анизотропии  $\kappa$  для  $h=0.5\xi(T)$  – сплошная синяя линия и  $h=1.5\xi(T)$  – пунктирная красная линия. Здесь  $H_{c2}(T)$  – верхнее критическое поле сверхпроводника и  $\xi(T)$  – длина когерентности.

В предельных случаях сильной магнитной анизотропии диполь стремится к состоянию либо «лёгкая ось» ( $\kappa \rightarrow +\infty: \theta_0 \rightarrow 0$ ), либо «лёгкая плоскость» ( $\kappa \rightarrow -\infty: \theta_0 \rightarrow \pi/2$ ). Наличие вихря в сверхпроводнике препятствует развороту дипольного момента в состояние «лёгкая плоскость». Мы обнаружили, что чем ближе диполь располагается к сверхпроводящей плёнке, тем сильнее отклонение дипольного момента от ориентации, определяемой исключительно магнитной анизотропией частицы. Для положительных величин  $\kappa$  магнитный диполь ориентируется перпендикулярно плёнке, а вихрь располагается строго под диполем. Зависимость расстояния вихря от магнитного диполя как функция параметра анизотропии представлена на Рисунке 16.

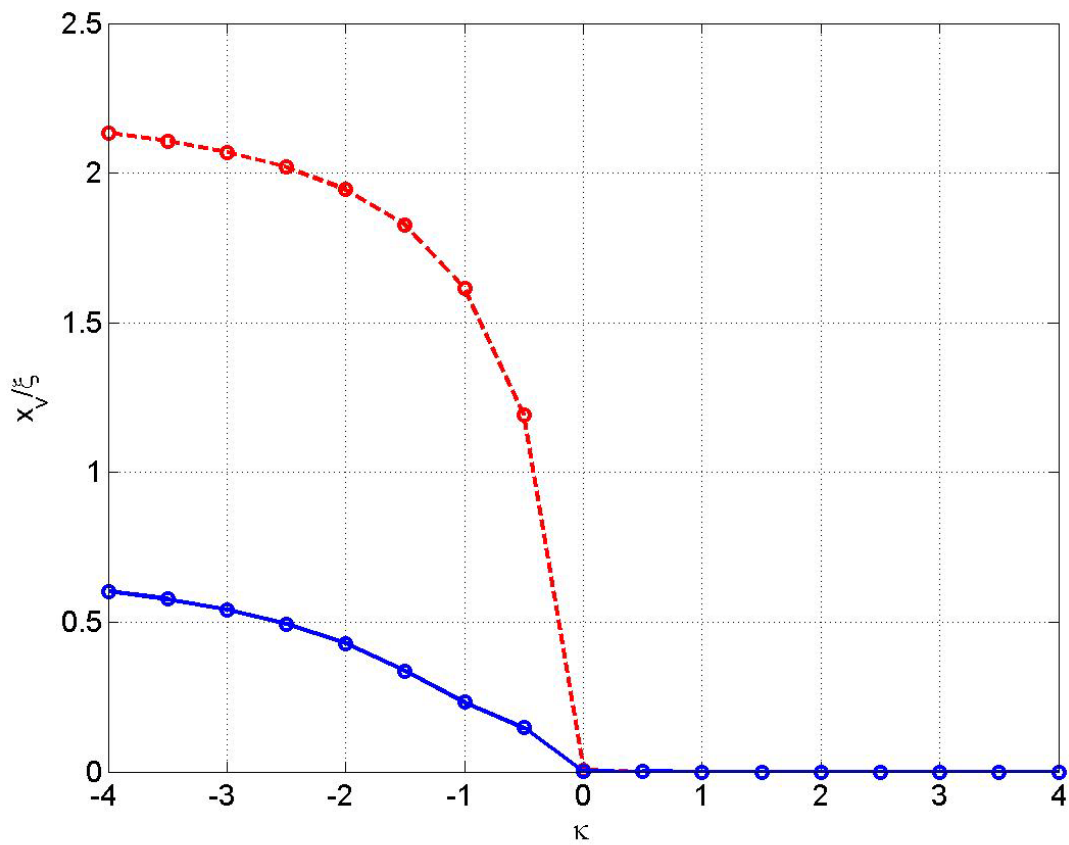


Рисунок 16. Зависимость расстояния вихря  $x_v$  от магнитного диполя как функция параметра анизотропии  $\kappa$  для различных значений  $h$ . Параметры те же, что и на Рисунке 15.

## 6. Изучение пространственного разрешения проекционной схемы нанолитографа в зависимости от числовой апертуры объектива и толщины фоторезиста

В настоящее время признано, что проекционная литография экстремального ультрафиолетового диапазона (ЭУФ) на длине волны  $\lambda=13,5$  нм наиболее рентабельна для массового изготовления современных интегральных схем. И хотя есть еще ряд нерешенных технических проблем, ожидается, что по этой технологии начнется производство микросхем с минимальными размерами элементов 22 нм в течение 2013–2014 гг.

К настоящему времени в мире работают три стенда проекционной нанолитографии, прототипы промышленных установок ( $\alpha$ -tools), обеспечивающие разрешение линий до 22 нм и кружков – до 32 нм. В конце 2011 г. компания ASML, Нидерланды, изготовила несколько установок, с повышенной производительностью, так называемых  $\beta$ (-tools). Для изучения фоторезистов и отработки процессов ЭУФ-литографии используются несколько стендов с двузеркальными проекционными объективами с повышенной до  $NA=0,3$  числовой апертурой.

В России до недавнего времени исследования по этой тематике ограничивались чисто теоретическими работами. Все экспериментальные работы были направлены на развитие элементной базы для ЭУФ литографии, прежде всего это источники ЭУФ излучения, многослойная рентгеновская оптика и фоторезисты, а так же на разработку методов защиты и очистки оптики от загрязнений. Ситуация изменилась в связи запуском в работу в ИФМ РАН лабораторного стенда проекционной ЭУФ литографии, фотография которого приведены на Рисунке 17.

Ключевой характеристикой литографической установки является производительность или скорость засветки фоторезиста. В наибольшей степени она зависит от мощности источника ЭУФ излучения, чувствительности фоторезиста на рабочей длине волны и коэффициентов отражения зеркал. Спецификой литографов ЭУФ диапазона является использование достаточно узкополостных,  $\delta\lambda/\lambda\approx 0,036$ , брэгговских зеркал. В нашем случае, с учетом отражения от пяти зеркал и градиентного распределения периода по поверхности сферических и асферических подложек (брэгговское условие должно выполняться в каждой точке поверхности зеркала), все это накладывает жесткие требования на точность воспроизведения резонансного периода напыляемых Mo/Si многослойных зеркал. На Рисунке 18 приведены измеренные спектральные зависимости коэффициентов отражения каждого зеркала и маски, а так же суммарное пропускание всей оптической системы (нижняя кривая). Как видно из рисунка пропускание оптической системы без фильтра составило  $T=5,6\%$  при спектральной полосе  $\delta\lambda/\lambda=2\%$ .



Рисунок 17. Фотография станда нанолитографа с лазерно-плазменным источником ЭУФ излучения.

Традиционно для проекционной ЭУФ литографии коэффициент конверсии определяется как отношение ЭУФ энергии излученной в полупространство в 2-х процентной спектральной полосе в окрестности длины волны  $13,5 \text{ нм}$  (полоса пропускания традиционной оптической схемы с 6-ти зеркальным проекционным объективом) к энергии лазерного импульса. В данной работе измерение коэффициента конверсии проводилось с использованием измерителя мощности с абсолютно калиброванными чувствительностью и спектральной полосой пропускания, которая с двумя  $Zr/Si$  отрезающими фильтрами составляла  $0,0083 \text{ A/Wm} \pm 10\%$ .

Телесный угол, из которого излучение из источника регистрировалось измерителем мощности, составлял  $\Omega = 7,9 \cdot 10^{-5}$  страд. Измеренная в максимуме ЭУФ мощность составила  $8,4 \text{ нВт}$ , что в пересчете на полупространство, соответствует  $0,7 \text{ мВт}$  полной мощности, генерируемой источником. Соответственно коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в ЭУФ составил  $0,03\%$ . Для фоторезиста с чувствительностью  $5 \text{ мДж/см}^2$  производительность

наноитографа составила  $1,8 \text{ см}^2/\text{час}$ , что вполне достаточно для научных и технологических исследований.

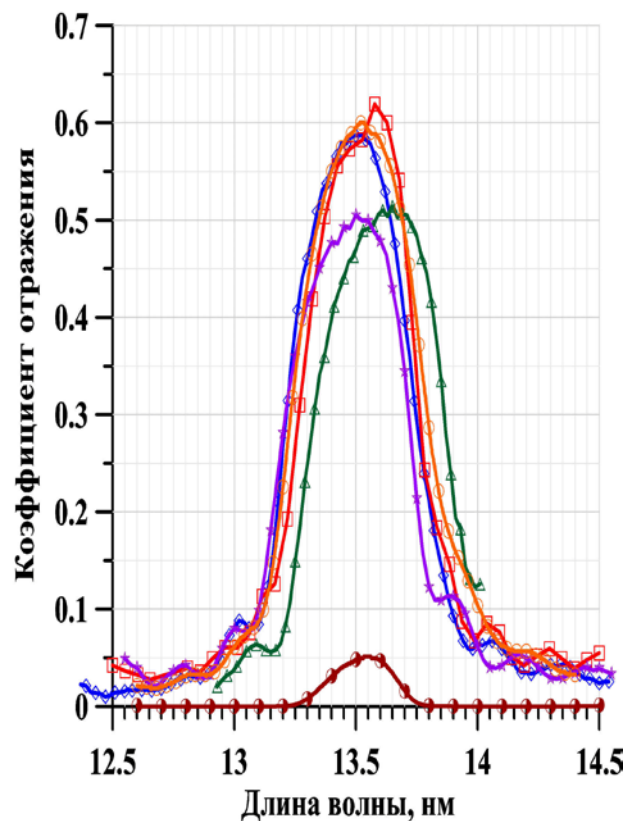


Рисунок 18. Спектральные зависимости коэффициентов отражения всех элементов схемы и интегральное пропускание системы без фильтра: —◇— синяя — коллектор, —○— оранжевая — гомогенизатор, —□— красная — маска, зеркала объектива —△— зеленая — M1 и —★— фиолетовая — M2, —●— красная — интегральное пропускание системы.

Для изучения загрязнения коллектора продуктами эрозии мишени на коллектор устанавливался свидетель, представляющий собой многослойное Mo/Si зеркало, нанесенное на кремниевую подложку с размерами  $15 \times 15 \text{ мм}^2$ . Часть образца закрывалась экраном, а другая – подвергалась загрязнению. На Рисунке 19 приведена зависимость коэффициента отражения от координаты точки падения излучения с  $\lambda=13,5 \text{ нм}$  на свидетель. Нижняя часть кривой соответствует области свидетеля, подвергнутой воздействию эрозионного потока в течение получаса, верхняя – закрытая часть. Как видно из рисунка, коэффициент отражения снизился примерно в 1,2 раза, что соответствует темпу загрязнения  $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ нм/импульс}$ . При планируемой интенсивности исследований этот темп загрязнений позволит работать около полугода без очистки коллектора от загрязнений.

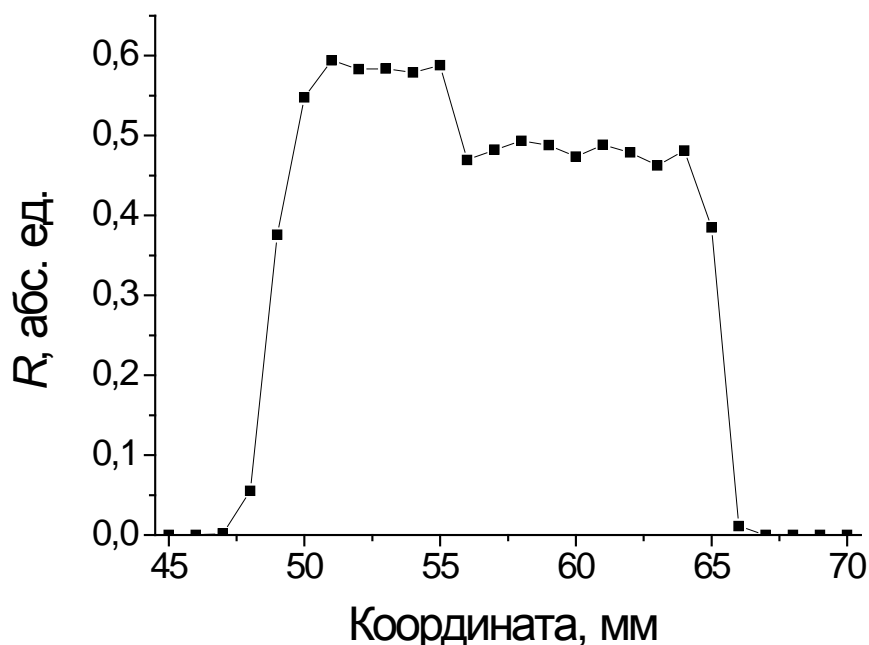


Рисунок 19. Зависимость коэффициента отражения Mo/Si зеркала-свидетеля от координаты точки падения излучения с  $\lambda=13,5$  нм. Верхняя часть соответствует закрытой, а нижняя – открытой областям свидетеля.

Эксперименты проводились с двумя масками. Первая маска представляла собой систему эквидистантных полос с периодом 100 мкм, которые на пластине изображались в виде полос с периодом 20 мкм. На Рисунке 20 слева приведено изображение полос, полученное с помощью интерференционного микроскопа на всем поле зрения проекционного объектива ( $0,6 \times 0,6$  мм<sup>2</sup>), справа – фрагмент изображения с атомно-силового микроскопа. В качестве резиста использовался образец ВПР-13 с чувствительностью 5 мДж/см<sup>2</sup>.

Для оценки предельной разрешающей способности проекционной схемы использовалась маска, представляющая собой набор полос различной ширины, которые, в случае идеальной схемы, должны проецироваться в полосы шириной 4; 1,3; 1; 0,2; 0,06 и 0,03 мкм. На Рисунке 21 приведены электронно-микроскопическое изображение маски – а), АСМ изображение микроструктур, сформированных методом проекционной ЭУФ литографии в фоторезисте – б) и его сечение, показанное линией – в). Как видно рисунок на пластине хорошо повторяет контур маски. Хорошо разрешаются линии шириной 4 и 1,3 мкм (линия шириной 1,3 мкм отмечена стрелками). Линии с размером от 1 мкм и ниже не разрешаются. Таким образом, разрешение оказалось примерно в 30 раз хуже, чем обеспечивают aberrации проекционного объектива. Такому разрешению соответствует суммарная угловая ошибка зеркал проекционного объектива около 4 мкрад.

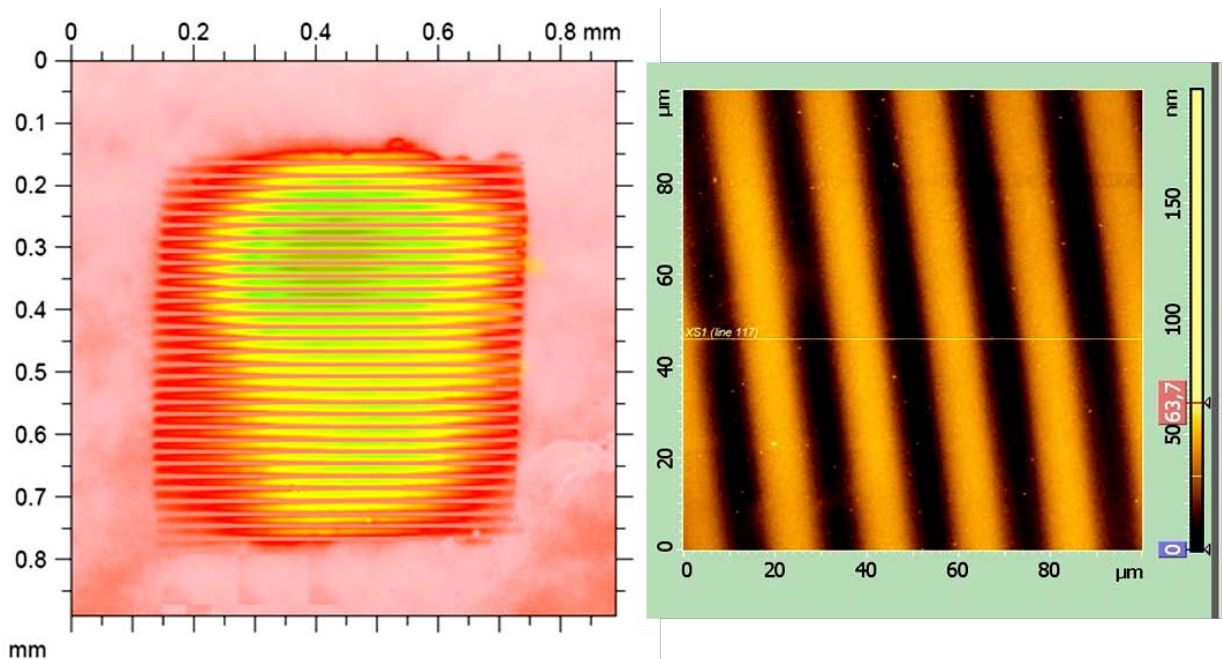


Рисунок 20. Изображение полос, сформированных в фоторезисте методом проекционной ЭУФ литографии: слева – по всему полю, справа – фрагмент, измеренный с помощью атомно-силового микроскопа.

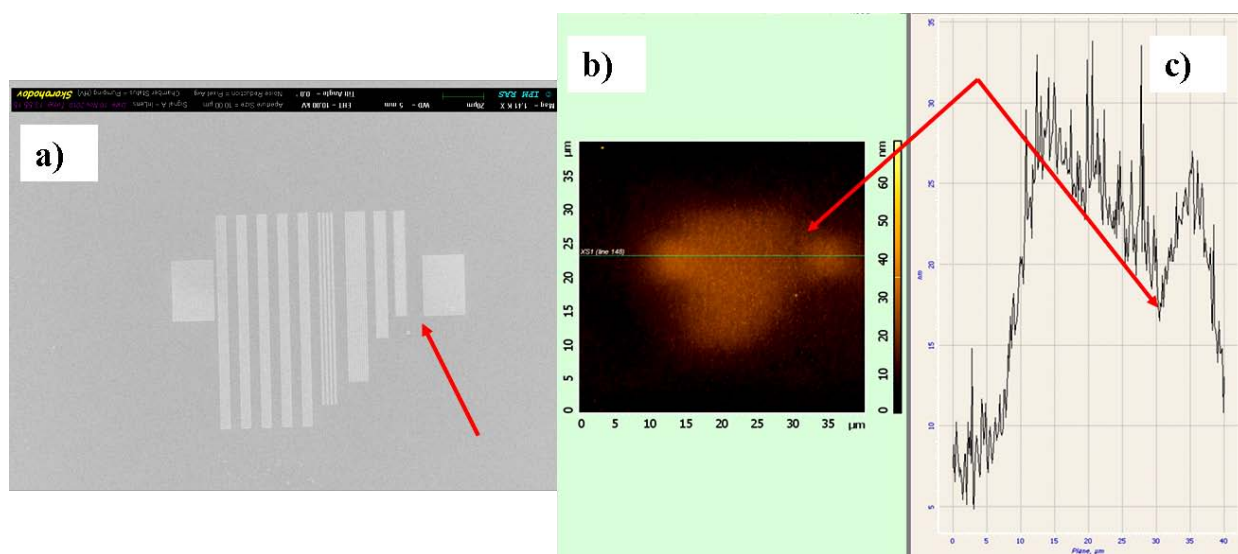


Рисунок 21. Электронно-микроскопическое изображение маски – а), АСМ изображение микроструктур, сформированных методом проекционной ЭУФ литографии в фоторезисте – б) и его сечение, показанное линией – с).

Проведенные первые эксперименты показали, что основные характеристики станда ЭУФ литографа, за исключением предельного пространственного разрешения, оказались близкими к расчетным значениям, что позволило впервые в России начать полноценные работы в области практической ЭУФ литографии.

Низкое разрешение объектива на данном этапе исследований было ожидаемо, связано с шероховатостью многослойных зеркал, лежащей в среднечастотном диапазоне. Было показано,

что ошибки формы зеркал, так называемые низкочастотные шероховатости с латеральными размерами лежащими в диапазоне от сотен до 1 мм, приводят к искажениям изображения как целого, например, круги трансформируются в эллипсы, но при этом размытия изображения не наблюдается. Из Рисунка 20 видно, что по всему полю зрения объектива полосы не искажаются, что говорит о том, что aberrации объектива достаточно малы. Иными словами, качество изображения коррелирует с данными измерений aberrаций объектива,  $RMS \approx 2$  нм.

Рассеяние на высокочастотных шероховатостях не приводит к размытию изображения, так как лучи рассеянные на них, выходят из брэгговского пика и для них не наблюдается интерференционного усиления. Шероховатости этого диапазона приводят только к потере интенсивности отраженного излучения. За размытие изображения (потерю разрешающей способности) ответственны шероховатости среднечастотного диапазона. Граница между высокочастотными и среднечастотными шероховатостями ( $l_{cr}$ ) находится там, где угол рассеяния становится меньше, чем ширина брэгговского пика  $\lambda/l_{cr} < \Delta \vartheta_{Br}$ . В этом случае для рассеянных лучей также выполняется условие синхронизма и их интенсивность становится сравнимой с интенсивностью зеркальных лучей. Иными словами, шероховатости этого диапазона слабо влияют на интегральный коэффициент отражения зеркала, однако «разбрасывают» пучок по углам. При  $\lambda = 13,5$  нм и  $\Delta \vartheta_{Br} = 5^\circ$  граница находится  $l_{cr} > \lambda / \Delta \vartheta_{Br} = 0,15$  мкм. Таким образом, шероховатости с латеральными размерами более 0,15 мкм приводят к размытию изображения.

В нашем случае коррекция (исправление) формы зеркал до нанометрового уровня производилась с помощью ионно-пучкового травления через маски на установке, описанной в [2]. Конструкция установки ионно-пучкового травления позволяет производить коррекцию крупногабаритных деталей при скользящих углах падения в диапазоне 10-45° по отношению к касательной поверхности. С учетом кривизны поверхности асферических зеркал, на периферии, даже при угле 45°, локальный скользящий угол падения был менее 30°. В работах [3,4] нами было показано, что при таких углах падения наблюдается развитие шероховатости.

На Рисунке 22 приведены профили шероховатости поверхности зеркал объектива до коррекции формы (в рамке) и после травления. Оба графика приведены в одном масштабе. Среднеквадратическая шероховатость возросла с 0,3 нм до 2 нм. При этом, как видно из рисунка, на поверхности появились структуры, с латеральными размерами 0,2-0,5 мкм, которые, как отмечалось выше, и приводят к размытию изображения.



Дополнительным подтверждением этого является и то, что в случае, если бы эта шероховатость приводила только к потере отраженной интенсивности, то не трудно показать, что коэффициенты отражения зеркал были бы около 12%, в то время как на практике они составляют около 50%.

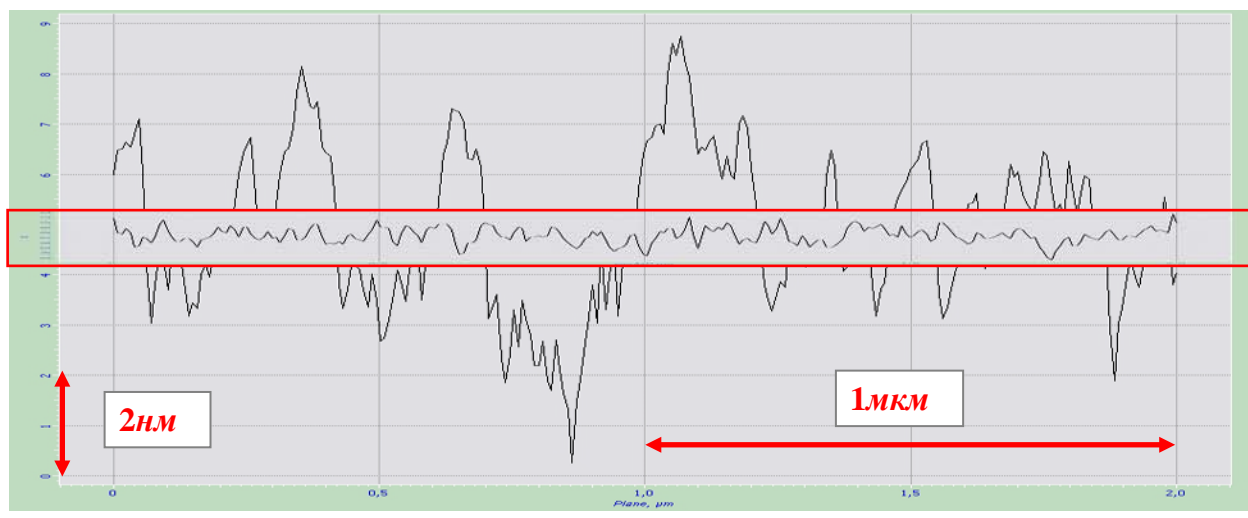


Рисунок 22. Профили шероховатости поверхности зеркал объектива до коррекции формы методом ионно-пучкового травления (в рамке) и после травления. Оба графика приведены в одном масштабе.

Следующим шагом станет изготовление новых зеркал, коррекция которых будет проводиться при нормальном падении ионов на деталь, при которых шероховатость не развивается [3-5] и после этого планируемое разрешение на уровне 30-40 нм будет получено. В настоящее время установка ионно-пучкового травления, позволяющая обрабатывать крупногабаритные детали при нормальных углах падения, уже запущена в работу [6].

## 7. Оптимизация химического состава и изучение отечественных фоторезистов на основе ПММА

Для решения современных задач микроэлектроники по достижению уровня разрешения интегральных микросхем (ИМС) менее 32 нм необходимо совершенствование, как установок экспонирования, так и полимерных резистов, в которых непосредственно и формируется рисунок будущей ИМС. Последнее осуществляется по одному из двух механизмов: либо за счет изменения молекулярной массы облученного полимера при разрыве или сшивании основной цепи, либо за счет изменения его полярности при кислотном гидролизе соответствующих функциональных групп полимера. Первый тип резистов используется в высокоэнергетичных видах литографии, а второй тип, называемый химически усиленными резистами, стал известен в начале 1980-х годов и получил широкое применение в фотолитографии 248 и 193 нм диапазона. Именно с этими резистами планируется осваивать наметившийся в последние годы переход в область литографии ЭУФ диапазона с длиной волны 13.5 нм.

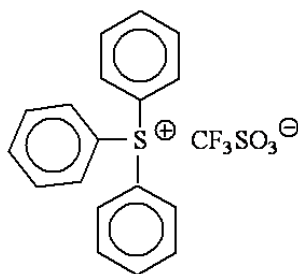
Выбор резистивных материалов для коротковолновой фотолитографии сопряжен с определенными трудностями из-за высокого поглощения всех органических соединений в области 193 нм и ниже. Наиболее прозрачными из известных полимерных резистов оказались полиметакрилаты, однако их практическому применению мешала низкая плазмостойкость. Решение этой проблемы было найдено в использовании алициклических структур, которые заметно улучшают плазмостойкость полиметакрилатов к сухому травлению без ухудшения прозрачности.

В качестве объектов исследования выступали:

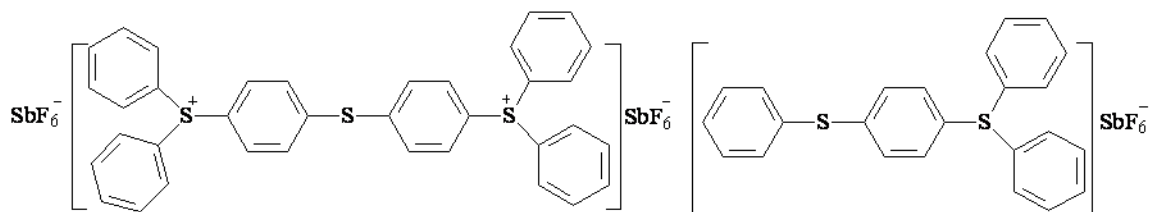
**Полимерная матрица** - тер-сополимеры метилметакрилат (**ММА**) - метакриловая кислота (**МАК**) - изоборнилметакрилат (**ИБМА**) и ММА-МАК-изоборнилакрилат (**ИБА**) мольного состава 53:27:20.

**Фотогенераторы кислоты (ФГК):**

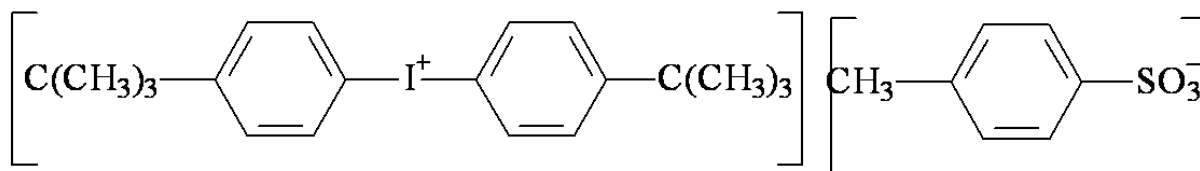
1. Трифенилсульфонийтрифлат (**ТФСТФ**):



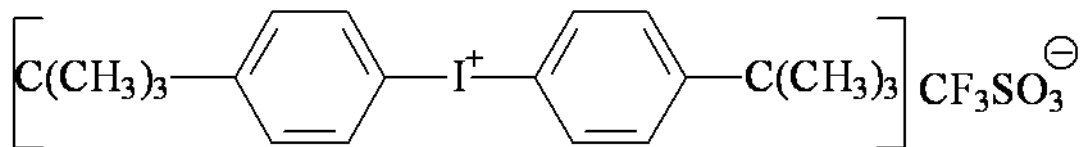
2. Сульфониевая соль **UVI 6974**:



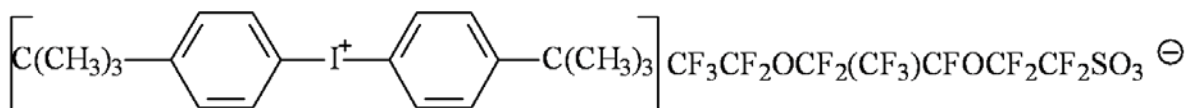
3. бис(4-третбутилфенилиодоний) *para*-толуолсульфонат (**ИОС-1**):



4. бис(4-третбутилфенилиодоний) трифлат (**ИОС-2**):

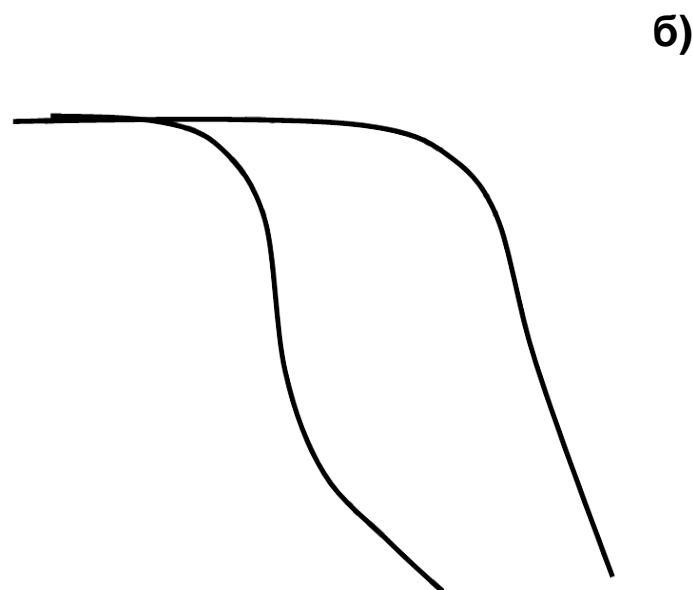
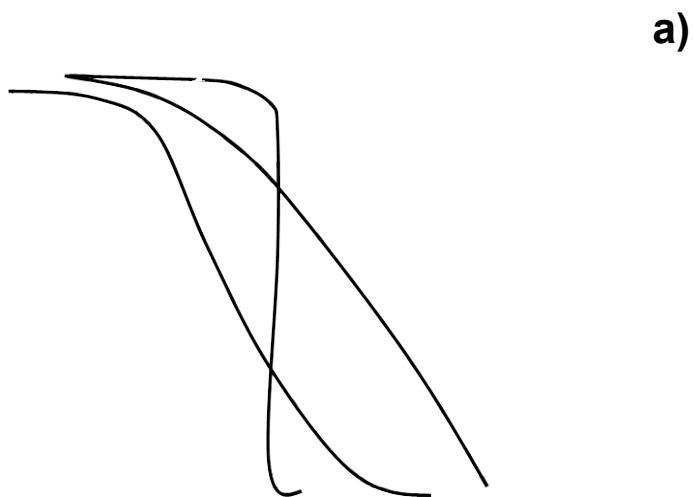


5. бис(4-третбутилфенилиодоний)-3,6-диокса-перфтор-4-трифторметилоктансульфонат (**ФИС**):



Формирование изображения в резистах на основе ИБА и ИБМА происходит за счет увеличения полярности сополимера в экспонированной области при кислотном гидролизе изоборнильного звена во время постэкспозиционного прогревания (ПЭП) с выделением камфена и новой молекулы кислоты.

Влияние химического строения полимерной матрицы на литографические свойства резиста иллюстрируют кривые УФ-чувствительности, приведенные на рис. 1 а) и б). Из графиков следует, что резисты с различной природой полимерной матрицы слабо различаются по чувствительности, но присутствие звеньев ИБА заметно улучшает контраст резиста.



$\lg D, \text{ мДж/см}^2$

Рисунок 23. Кривые чувствительности к УФ (254 нм) резистов на основе сополимеров ИБА-ММА-МАК (а) и ИБМА-ММА-МАК (б) с 2 мас.% ТФСТФ (1), 6974 (2) и ИОС-2 (3) прогревание до- и после экспонирования при 130°/60 сек и при 140°/60 сек, соответственно, проявление в 0.05N тетраэтиламмоний гидроксид (ТЭАГ)+ изопропиловый спирт (ИПС) = 10:1

В случае электронно-лучевой литографии чувствительность резистов к электронному лучу при прочих равных условиях практически одинакова, но контраст резиста на основе ИБА втрое выше, чем ИБМА-содержащего резиста. С возрастанием энергии излучения втрое (от 10 до 30 кэВ), чувствительность резиста ухудшается на порядок и одновременно существенно возрастает контраст изображения

В ЭУФ- литографии резист на основе ИБА-ММА-МАК сополимера показал не только втрое лучший контраст по сравнению с сополимером ИБМА-ММА-МАК, но и в 2.5 раза более высокую чувствительность (таблица).

**Таблица 1.** Литографические характеристики резистов с 8% ТФСТФ в ЭУФ-литографии при до-и постэкспозиционном прогревании 130° и 140°С, соответственно, в течение 1 мин.

Резист	D, мДж/см <sup>2</sup>	Контраст	Проявитель
ИБМА-ММА-МАК	20	5.4	0.05N ТЭАГ+ ИПС = 10:1, 60 сек
ИБА-ММА-МАК	8	16.4	0.01N ТЭАГ+ ИПС = 20:1, 30 сек

Изучение влияния строения фотогенератора кислоты на литографические свойства резиста при облучении УФ с длиной волны 254 нм показало, что

- Обе сульфониевые соли (ТФСТФ и UVI 6974) обеспечивают позитивное изображение с достаточно высокой чувствительностью.
- В присутствии иодониевых солей либо вообще не образуется рисунка (ИОС-1 и ФИС), либо резист имеет плохую чувствительность и контраст (ИОС-2).
- Наилучшей ДУФ-чувствительностью обладают композиции с ТФСТФ.
- Катализатор ФИС не вызывает гидролиза обоих сополимеров, что связано, во-первых, с его низкой термостабильностью, а во-вторых, из-за низкой диффузии кислоты по причине больших размеров ее аниона.

Основные результаты этого исследования можно сформулировать следующим образом.

- ❖ Изучены литографические свойства химически усиленных резистов на основе тройных сополимеров ММА-МАК-ИБА и ММА-МАК-ИБМА в сочетании с пятью сульфониевыми солями различного химического строения в качестве фотогенераторов кислоты.

- ❖ Чувствительность резистов к ДУФ и к электронному лучу не зависит от химического строения полимерной матрицы и определяется лишь природой фотогенератора кислоты. Самую высокую чувствительность резисту обеспечивает трифенилсульфоний трифлат.
- ❖ Замена звеньев ИБМА на звенья ИБА в составе тер-сополимера способствует повышению контраста резиста, а в ЭУФ-литографии - и возрастанию чувствительности.

## 8. Создание образцов магнитных наноструктур с топологическими нормами 30 нм

Развитие современной микроэлектроники привело к созданию перспективного и быстро растущему в последние годы направлению современной науки и техники - спинтроники, основу которой составляет использование спиновой степени свободы носителей заряда. Формирование этой отрасли знания в совокупности с достижениями в области нанотехнологий все сильнее стимулирует интерес к прикладным и фундаментальным исследованиям в области наномagnetизма. Одним из основных объектов таких исследований являются ферромагнитные (ФМ) частицы различных форм и состава, размеры которых сопоставимы с характерными магнитными масштабами - толщиной доменной стенки, обменной магнитной длиной. В рамках этапа была разработана технология изготовления двумерных упорядоченных массивов ферромагнитных наночастиц двух разных типов.

Во-первых, двумерные периодические системы ФМ наночастиц планарно изолированных друг от друга (паттернированные структуры) являются перспективной системой в исследованиях по созданию среды для сверхплотной магнитной записи [7]. Размер битов таких систем вплотную приближается к фундаментальным длинам, определяющим магнитную восприимчивость ферромагнетиков (около 10 нм), и при создании таких структур возникают трудности принципиального характера, сильно ограничивающие их размеры: возрастает роль термических флуктуаций, что ведет к суперпарамагнетизму, а при малых расстояниях между битами необходимо учитывать их взаимовлияние, обусловленное магнитостатическим взаимодействием. Формирование таких структур все еще представляет определенные технологические сложности, а диагностика их магнитных свойств является непростой экспериментальной задачей.

Системы второго типа, состоящие из ФМ частиц, могут использоваться в качестве основного элемента таких приборов, как магниторезистивная память или магниторезистивные сенсоры [8]. Основой этих элементов является многослойная структура из двух или трех слоев ферромагнетика, разделенных диэлектрическими прослойками. Сопротивление частиц, сформированных из такой многослойной структуры, зависит от взаимной ориентации намагниченности этих слоев. Подобные магниторезистивные элементы, использующие эффект туннельного магнитного сопротивления, являются основой создания новых систем магнитной памяти, получившей в англоязычной литературе название MRAM (Magnetic Random Access Memory), – магнитная память со свободным доступом. Свойства магниторезистивного элемента очень сильно определяются не только геометрическими размерами и выбором материалов, но и его формой. Так, например, теоретические модели предсказывают, что изменение прямоугольной формы элемента на эллиптическую при одинаковых размерах более чем на порядок изменяет величину магнитного поля, в котором происходит перестройка антиферромагнитного порядка в

соседних слоях структуры на ферромагнитный. Это может катастрофически повлиять на электрические характеристики структур, и возможность их применения в системах магнитной записи. Однако, информация о подобных систематических экспериментальных работах отсутствует. Одна из причин этого связана с тем, что планарные размеры таких элементов должны быть  $\leq 100$  нм. Например, по оценкам для получения оптимальных электрических характеристик геометрические размеры эллиптического магниторезистивного элемента должны составлять  $\sim(50 \times 30)$  нм. Управление формой частицы при таких размерах и подсоединение её к измерительной цепи является довольно сложной технологической задачей.

Магнитные наноструктуры формировались методом электронно-лучевой литографии с применением позитивных и негативных резистов, промежуточных масок из многослойных металлических пленок (V, Cr, Ti, Cu, Sc, Al) в комбинации с последующим их плазмохимическим и ионным травлением. При оптимизации процедур электронно-лучевой литографии для изготовления больших (общим размером до  $0.5 \times 0.5$  мм) массивов магнитных частиц с линейными размерами  $\geq 100$  нм применялся позитивный резист ПММА с использованием lift-off методики. Для формирования магнитных частиц меньшего размера предпочтение было отдано высоко-разрешающим негативным электронным резистам. При этом были изучены особенности применения нескольких типов доступных нам негативных резистов: коммерческий ma-N 2403, материалы отечественного производства на основе фенолальдегидных смол ФП 9120 и ФП 051 (которые широко применяются в фотолитографии ультра-фиолетового диапазона длин волн) и фуллерены. В ходе этих работ:

- 1) показана возможность применения позитивных и негативных УФ резистов в качестве негативного электронного резиста при формировании масок, стойких к ионному и плазмохимическому травлению, и позволяющие создавать изолированные элементы (столбики с диаметром основания менее 100 нм) с высоким аспектным отношением ;
- 2) определены характеристики фуллеренов, как негативного резиста для применения в низковольтной (1- 30 КэВ) и высоковольтной (100, 200 КэВ) электронной литографии; методом вторично-ионной масс-спектропии изучены структурные изменения, происходящие при взаимодействии электронного пучка с пленкой  $C_{60}$ ;
- 3) проведены эксперименты по созданию масок и формированию магнитных решеток из элементов предельно малых размеров с помощью электронно-стимулированной полимеризации остаточных паров углеводородов (“contamination lithography”) и с применением остро фокусированных ионных пучков (FIB);
- 4) оптимизированы материалы вспомогательных металлических слоев, их толщины, режимы ионного и реактивного распыления, используемые для переноса литографического рисунка при



формировании рабочих магнитных наноструктур (как изолированных, так и плотноупакованных систем магнитных наночастиц).

Примеры использования разработанной технологии для формирования ФМ наночастиц, которые могут быть применены в качестве основных элементов магнитной памяти, приведены на Рисунке 24а. Магнитно-силовые изображения наночастиц, часть которых была перемагничена с помощью зонда МСМ, демонстрирующая работоспособность данной технологии формирования магнитных наночастиц приведена на Рисунке 24б.

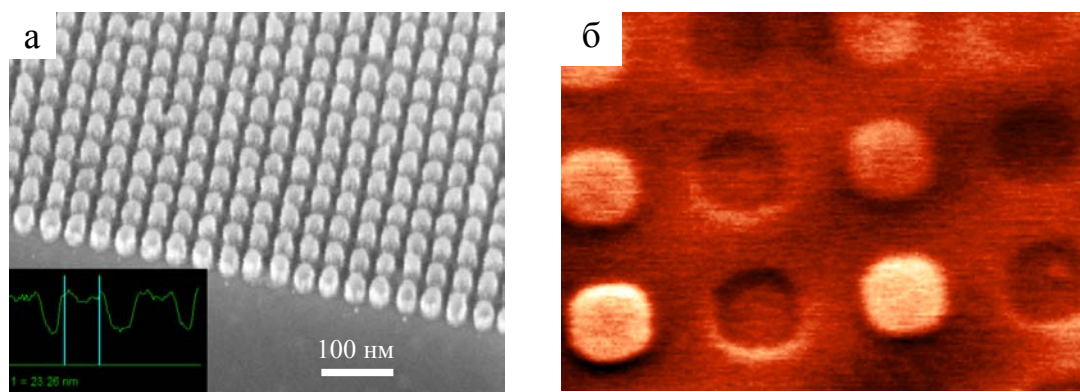


Рисунок 24. Решетка Co-Pt магнитных дисков: а) СЭМ микрофотография во вторичных электронах массива трехслойных частиц Co-Pt диаметрами  $\sim 20$  нм; б) МСМ изображение частиц диаметром  $\sim 100$  нм.

Таким образом, в результате проведенных исследований развиты методы формирования искусственных упорядоченных решеток магнитных наноструктур, состоящих из частиц контролируемой формы с минимальными планарными размерами  $\sim 30$  нм. Получены изображения с магнитным контрастом.

## Заключение

Все задачи пятого этапа проекта выполнены полностью:

1. Исследован поперечный спин-зависимый транспорт в многослойных нанодисках, содержащих три слоя ферромагнетика, разделенных немагнитными прослойками. Изучен диодный эффект при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков.
2. Разработана методика измерений эффектов, связанных с «топологическим» эффектом Холла, а также эффектов связанных с выпрямлением переменного электрического тока в структурах со спиральным распределением намагниченности.
3. Изучены эффекты, связанные с топологическим эффектом Холла в нанодисках с вихревым распределением намагниченности.
4. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных для гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, выполнено их сравнение их с результатами теоретических расчетов.
5. Рассчитана энергетически выгодная ориентация намагниченности свободно вращающейся ферромагнитной частицы над сверхпроводником и структуры стабильного вихревого состояния в сверхпроводнике.
6. Изучено пространственное разрешение проекционной схемы нанолитографа в зависимости от числовой апертуры объектива и толщины фоторезиста.
7. Выполнена оптимизация химического состава и изучены отечественных фоторезисты на основе ПММА.
8. Созданы образцы магнитных наноструктур с топологическими нормами 30 нм.

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по 5 этапу. По результатам работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых российских и международных журналах. Большая часть полученных результатов докладывалась на международной конференции «Наноп физика и наноэлектроника-2012» (г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 года) - опубликовано 4 тезиса в конференционном сборнике.

## Список использованных источников

- [1] **Aladyshkin, A.Yu.** Reverse-domain superconductivity in superconductor-ferromagnet hybrids: effect of a vortex-free channel on symmetry of  $I$ - $V$  characteristics / A.Yu. Aladyshkin, D.Yu. Vodolazov, J. Fritzsche, R.B.G. Kramer, V.V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. **97**. – N. 052501.
- [2] **Chkhalo, N.I.** N.I. Chkhalo, E.B. Kluev, A.E. Pestov // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. V.603. 2009. Issues 1-2. 2009. P. 62-65.
- [3] **Chkhalo, N.I.** Manufacturing and characterization the diffraction quality normal incidence optics for the XEUV range / N.I. Chkhalo, M.M. Barysheva, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov // *Proc. of SPIE* –2011.- V. 8076.- P. 80760P-1-13.
- [4] **Вайнер, Ю.А.** Развитие шероховатости поверхности плавленого кварца и покрытий Cr/Sc при травлении ионными пучками/ Ю.А. Вайнер, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, И.Л. Струля, Н.И. Чхало, Р.А. Храмов // *Известия РАН. Серия физическая.*- 2011.- Т. 75(1).- С. 65-67.
- [5] **Барышева, М.М.** Развитие шероховатости сверхгладких поверхностей при ионно-пучковом травлении / М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Р.А. Храмов, Н.И. Чхало // *Известия РАН. Серия физическая.*- 2012. - Том 76. – Вып. 2. - С. 190-195.
- [6] **Забродин, И.Г.** Установка ионно-пучковой и плазмохимической прецизионной коррекции формы оптических поверхностей / И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, А.Е. Пестов, Н. Н. Салашченко, Н.И. Чхало // *Труды 16-го Международного симпозиума «Нанопластика и наноэлектроника»*, Нижний Новгород, Россия, 12-16 марта 2012. Т. 2. С. 576.
- [7] **Weiss N.**, Uniform Magnetic Properties for an Ultrahigh-Density Lattice of Noninteracting Co Nanostructures / N. Weiss, T. Cren, M. Epple, S. Rusponi, G. Baudot, S. Rohart, A. Tejeda, V. Repain, S. Rousset, P. Ohresser, F. Scheurer, P. Bencok, and H. Brune // *Phys. Rev. Lett.* – 2005.- Vol.95 –N. 157204
- [8] **Parkin, S.S.** Exchange-biased magnetic tunnel junctions and application to nonvolatile magnetic random access memory / S. S. P. Parkin, K. P. Roche, M. G. Samant, P. M. Rice, R. B. Beyers, R. E. Scheuerlein, E. J. O’Sullivan, S. L. Brown, J. Bucchigano, D. W. Abraham, Yu Lu, M. Rooks, P. L. Trouilloud, R. A. Wanner, and W. J. Gallagher // *J.Appl.Phys.* – 1999. –Vol. 85 – N. 5828.

## Список публикаций

По результатам работ 5 этапа государственного контракта 02.740.11.0540 было опубликовано 4 статьи в реферируемых российских журналах (копия первой и последней страницы статей прилагаются к отчету)

[1] **Вдовичев, С. Н.** Магнитосопротивление и неколлинеарные состояния многослойных ферромагнитных наночастиц / С. Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, С. А. Гусев, А. Ю. Климов, В. Л. Миронов, И. М. Нефедов, В. В. Рогов, А. А. Фраерман, И. А. Шерешевский // Письма в ЖЭТФ .- 2011 .- Т. 94 .- Вып. 5 .- С. 418 – 421.

[2] **Булгакова, С. А.** Влияние химического строения (со)полимеров резистов на их чувствительность к радиационному излучению / С. А. Булгакова, М. М. Джонс, Е. А. Киселева, Е. В. Скороходов, А. Е. Пестов, А. Я. Лопатин, С. А. Гусев, В. И. Лучин, Н. И. Чхало, Н. Н. Салащенко // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76.- Вып. 2.- С. 186-189.

[3] **Барышева, М.М.** Развитие шероховатости сверхгладких поверхностей при ионно-пучковом травлении / М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Р.А. Храмков, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая.- 2012. - Том 76. – Вып. 2. - С. 190-195.

[4] **Гусев, С.А.** Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13,5 нм / С.А. Гусев, С.Ю. Зуев, А.Ю. Климов, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, В.В. Рогов, Н.Н. Салащенко, Е.В. Скороходов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – Вып. 7 - С. 1-7.

Было также сделано 4 доклада на международной конференции «Нанofизика и наноэлектроника-2012» (г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 года):

[1] А.С. Бондаренко, С.А. Гусев, Б.А. Грибков, Е.В. Скороходов. **Изготовление ферромагнитных частиц для исследования их магнитной структуры методом сканирующей просвечивающей микроскопии.** Труды 16-го международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 г., т.1, с. 160.

[2] С.А. Булгакова, М.М. Джонс, А.Б. Новиков, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, Е.В. Скороходов, Н.Н. Салащенко. **Химически усиленные резисты для литографии высокого разрешения.** Труды 16-го международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 г., т.2, с. 544-545.

[3] Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Грибков Б.А., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И., Щербаков А.В. **Изучение шероховатости супергладких**

**поверхностей для изображающей рентгеновской оптики дифракционного качества.** Труды 16-го международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 г., т.2, с. 538-539.

[4] И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, А.Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, Н.И. Чхало, **Установка ионно-пучковой и плазмохимической прецизионной коррекции формы оптических поверхностей,** Труды 16-го Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 12-16 марта 2012. Т. 2. С. 576.

Копии первых и последних страниц докладов из конференционного сборника прилагаются к отчету.

### **Семинары по теме НИР проведенные в ИФМ РАН для сотрудников, аспирантов и студентов**

1) *25 апреля 2012*

А.А.Беспалов

**Ферромагнитные сверхпроводники**

2) *26 марта 2012*

О. Г. Удалов, М. В. Сапожников

**Невзаимное рассеяние света решеткой магнитных вихрей**

3) *20 февраля 2012*

А.С.Мельников

**Сверхпроводимость в низкоразмерных электронных системах, индуцированная за счет эффекта близости**

4) *10 февраля 2012*

Н.Н.Салащенко

**Свободностоящие многослойные пленочные структуры, как элементы рентгенооптики**

5) *30 января 2012*

Д.Ю.Водолазов

**Критические флуктуации в 2D сверхпроводящих пленках при токах близких к току распаривания**