

**УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
МИКРОСТРУКТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

УДК 538.9

№ 01201056532

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор ИФМ РАН,  
д-р. физ.-мат. наук, проф.  
\_\_\_\_\_ З. Ф. Красильник  
« 29 » апреля 2011 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)**

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

Руководитель темы:

\_\_\_\_\_

С. В. Гапонов

подпись, дата

**Нижний Новгород 2011**

## 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 6-10)
Зам. директора, д.ф.-м.н.	_____	А.А. Фраерман (раздел 1, заклучение)
Зам. директора, д.ф.-м.н.	_____	А.С. Мельников (раздел 5, заклучение)
зав. лаб., д.ф.-м.н.	_____	Н.И. Чхало (введение, раздел 6- 10, приложение А,Б)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С. А. Гусев (раздел 1)
С.н.с., д.ф.-м.н.	_____	В.Л. Миронов (раздел 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	Н.И. Полушкин (раздел 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.В. Самохвалов (раздел 3)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	И.Д. Токман (раздел 3)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Ю. Аладышкин (раздел 2-3)
С.н.с., к.ф.-м.н., нормоконтролер	_____	Д.Ю. Водолазов (введение, раздел 1- 10, заклучение)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С.Н. Вдовичев (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	М. М. Барышева (раздел 6-7)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Б.А. Грибков (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Е. Пестов (раздел 6-10, приложение А,Б)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Д.А. Рыжов (раздел 3)

Н.с., к.ф.-м.н.	_____	М.А. Силаев (раздел 3)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	О.Г. Удалов (раздел 1)
Н.с.	_____	А.Я. Лопатин (раздел 6-10, приложение А,Б)
Н.с.	_____	А.В. Чигинев (раздел 3)
М.н.с	_____	В.Н. Полковников (раздел 6-7, приложение А)
М.н.с	_____	Н.Н. Цыбин (раздел 6-7)
Инженер-технолог 1-й категории	_____	Ю.А. Вайнер (раздел 6-10)
Ведущий инженер электроник	_____	С.Ю. Зуев (раздел 6-10)
Ведущий инженер-технолог	_____	А.Ю. Климов (раздел 1,6)
Ведущий инженер-технолог	_____	В.В. Рогов (раздел 1)
Инженер 2-й категории	_____	М.Н. Торопов (раздел 6-8)
Аспирант	_____	О.Л. Ермолаева (раздел 1)
Аспирант	_____	Е.В. Скороходов (раздел 7)
Аспирант	_____	Е.А. Караштин (раздел 1)
Аспирант	_____	К.Р. Мухаматчин (раздел 1)
Аспирант	_____	Д. А. Савинов (раздел 2-3)
Аспирант	_____	И. М. Хаймович (раздел 2)
Аспирант	_____	С. В. Миронов (раздел 5)
Студент	_____	А. А. Беспалов

Студент	_____	(раздел 2) Д. Н. Рогачев
Студент	_____	(раздел 7) А.С. Скрыль
Студент	_____	(раздел 7) Р.А. Храмков
	_____	(раздел 9)

## Реферат

Отчет 79 страниц, 10 частей, 39 рисунков, 40 источников.

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

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 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 3 этапе являлось выполнение ряда технологических, экспериментальных и теоретических работ, направленных на: (а) теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводящих свойств металлических (в том числе гибридных сверхпроводящих/ферромагнитных) наноструктур, (б) развитие методов создания и рентгенооптической диагностики структурных свойств металлических наноструктурированных систем. В частности, на третьем этапе были получены следующие результаты:

1. Изготовлены магнитные туннельные контакты субмикронных размеров, состоящих из двух слоев ферромагнетика (CoFe), разделенных диэлектрической прослойкой ( $TaO_x$ ). Для измерения вольтамперных характеристик и магнитосопротивления туннельных магнитных контактов изготовлен специализированный измерительный стенд и были проведены измерения эффекта магнитосопротивления этих структур.

2. Исследовано формирование вихревых структур, состоящих из цепочек вихрей и антивихрей, в периодическом магнитном поле. Исследовано формирование локализованных сверхпроводящих структур вблизи доменных стенок и границ сверхпроводящих образцов, а также формирование вихревых структур, состоящих из вихрей и антивихрей, в узких сверхпроводящих мостиках в поле провода с током. Экспериментально и теоретически определена зависимость критического тока от температуры, внешнего магнитного поля и силы тока в проводе.

3. Экспериментально и теоретически исследована анизотропия и асимметрия критического тока сверхпроводящих мостиков в поле одномерной доменной структуры. Теоретически исследована анизотропия критического тока сверхпроводящих мостиков в поле магнито-мягких и магнито-жестких ферромагнитных частиц.

4. Рассчитаны вольтамперные характеристики коротких и длинных сверхпроводящих нанопроволок. Показано, что динамический процесс проскальзывания фазы (приводящий к конечному сопротивлению сверхпроводника) существует в сверхпроводнике, пока время изменения модуля параметра порядка (зависящее от длины проволоки, неупругого времени релаксации неравновесных квазичастиц, температуры и магнитного поля) больше, чем время изменения разности фаз сверхпроводящего параметра порядка (зависящего только от температуры и приложенного тока).

5. На основе нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау изучено влияние неоднородного магнитного поля, созданного ферромагнетиком с доменным распределением намагниченности, на флуктуационную проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии вблизи температуры перехода. Показано, что при стремлении температуры к критической доминирующий вклад в проводимость сверхпроводящей пленки вносят квазиодномерные области (с шириной порядка длины когерентности), формируемые вблизи доменных границ ферромагнитной подсистемы.

6. Впервые в России создан проекционный объектив нанолитографа с волновыми aberrациями  $\sim \lambda/7$  на рабочей длине волны  $\lambda=13,5$  нм, что уже позволяет получить изображение с разрешением десятки нанометров. Разработаны методики аттестации сферических и асферических поверхностей и волновых aberrаций объективов с субнанометровой точностью.

7. Были изучены Mo/Si<sub>2</sub> барьерные слои. Эксперименты показали, что при малых толщинах, примерно до 0,7 нм, антидиффузионный слой не оказывает заметного влияния на коэффициент отражения, в то время как при увеличении его толщины наблюдается падение коэффициента отражения.

8. Были разработаны и изготовлены следующие узлы нанолитографа: 1) источник излучения, 2) светосильное зеркало-коллектор, обеспечивающее сбор излучения из большого телесного угла, 3) сложное составное зеркало-гомогенизатор, обеспечивающее П-образное распределение интенсивности на маске с заданными пространственно-угловыми характеристиками, 4) многослойная отражательная маска-шаблон, на которой формируется топология наноструктуры и изображение которой с помощью проекционного объектива с уменьшением переносится на пластину с фоторезистом.

9. Создано и аттестовано выпуклое зеркало для нанолитографа. Показано, что традиционный метод расчета дифракционных корректоров волнового фронта, не учитывающий преломление на границах не обеспечивает требуемой субнанометровой и даже нанометровой точности и, соответственно, требуется развитие новых алгоритмов.

10. Была разработана конструкция стенда нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным разрешением 30 нм. Показана однозначная корреляция между aberrациями объектива и показаниями датчиков положения зеркал.

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

- 1) Разработку технологии создания контактов к многослойным нанодискам, для измерения диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков.
- 2) Расчет структуры смешанного состояния сверхпроводника в периодическом магнитном поле и изучение движения вихревых структур при протекании по сверхпроводнику транспортного тока.
- 3) Расчет величины критического тока перехода в резистивное состояние для планарной системы сверхпроводник - ферромагнетик с одномерной доменной структурой и системы сверхпроводник – решётка магнитных наночастиц, в зависимости от направления тока по отношению к магнитным доменам в присутствии внешнего магнитного поля.
- 4) Расчет условий существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих металлических проволоках в зависимости от времени релаксации неравновесной функции распределения квазичастиц, длины проволоки и приложенного магнитного поля при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода.
- 5) Расчет флуктуационной добавки к проводимости (парапроводимости) в квазиодномерных сверхпроводниках и тонких пленках сверхпроводника в неоднородном магнитном поле.
- 6) Изготовление и аттестацию волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа.
- 7) Изучение влияния антидиффузионных барьерных слоев силицида молибдена в Mo/Si МС на коэффициенты отражения в ЭУФ диапазоне.
- 8) Изготовление узлов стенда проекционной схемы нанолитографа.
- 9) Изготовление выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива.
- 10) Разработку конструкции стенда проекционной литографии на длину волны 13.5 нм.

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по 3 этапу. По результатам работы опубликовано 10 статей в отечественных и зарубежных журналах и 6 тезисов в конференционных сборниках. Большая часть полученных результатов докладывалась

на институтских семинарах и 15-ом Международном симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника» (14-18 марта 2011 г., Нижний Новгород).

Участником НИР (Чигиневым А. В.) была защищена кандидатская диссертация на тему 'Резонансное взаимодействие движущихся джозефсоновских вихрей и линейных волн в распределенных джозефсоновских системах' .



## Содержание

Введение.....	11
1. Разработка технологии создания контактов к многослойным нанодискам, для измерения диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков .....	12
2 Расчет структуры смешанного состояния сверхпроводника в периодическом магнитном поле и изучение движения вихревых структур при протекании по сверхпроводнику транспортного тока .....	17
3. Расчет величины критического тока перехода в резистивное состояние для планарной системы сверхпроводник - ферромагнетик с одномерной доменной структурой и системы сверхпроводник – решётка магнитных наночастиц, в зависимости от направления тока по отношению к магнитным доменам в присутствии внешнего магнитного поля. ....	24
4. Расчет условий существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих металлических проволоках в зависимости от времени релаксации неравновесной функции распределения квазичастиц, длины проволоки и приложенного магнитного поля при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода .....	33
5. Расчет флуктуационной добавки к проводимости (парапроводимости) в квазиодномерных сверхпроводниках и тонких пленках сверхпроводника в неоднородном магнитном поле .....	39
6. Изготовление и аттестация волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа.....	43
7. Изучение влияния антидиффузионных барьерных слоев силицида молибдена в Mo/Si МС на коэффициенты отражения в ЭУФ диапазоне .....	49
8. Изготовление узлов стенда проекционной схемы нанолитографа .....	50
9. Изготовление выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива .....	56
10. Разработка конструкции стенда проекционной литографии на длину волны 13.5 нм .....	59
Заключение.....	60
Список использованных источников.....	61
Список публикаций, тезисов выступлений на конференциях и проведенных семинаров по теме НИР .....	65
Приложение А. Акт испытания проекционного объектива нанолитографа .....	68
Приложение Б. Акт испытания выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива .....	74

## 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.  $\xi_0$  – сверхпроводящая длина когерентности при нулевой температуре
10.  $I_c$ - критический ток сверхпроводника

В тексте отчета все физические величины приведены в системе единиц СИ.

## **Введение**

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 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 3 этапе являлось выполнение ряда технологических, экспериментальных и теоретических работ, направленных в основном на: (а) теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводящих свойств металлических (в том числе гибридных сверхпроводящих/ферромагнитных) наноструктур, (б) развитие методов создания и рентгенооптической диагностики структурных свойств металлических наноструктурированных систем.

## 1. Разработка технологии создания контактов к многослойным нанодискам, для измерения диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков.

Интерес к гальваномагнитным свойствам многослойных систем, содержащих ферромагнитные слои, обусловлен возможностью создания на их основе новых устройств записи и хранения информации [1,2]. Наибольшее внимание уделяется элементу магнитной памяти, состоящему из двух слоев ферромагнетика, разделенных немагнитной прослойкой, сопротивление которого зависит от взаимной ориентации намагниченности этих слоев. Подобные магниторезистивные элементы являются основой создания новых систем магнитной памяти, получившей в англоязычной литературе название MRAM (Magnetic Random Access Memory), – магнитная память со свободным доступом.

Способ измерения гальваномагнитных свойств магнитного туннельного контакта (МТК) во многом определяет геометрию изготавливаемой структуры. В наших измерениях использовался 2-х контактный способ измерений транспортных свойств с механическим прижимом токовых контактов к подводящим электродам МТК. Основой магнитного туннельного контакта является двухслойная магнитная частица с субмикронными латеральными размерами, в которой два магнитных слоя разделены диэлектрическим туннельно-прозрачным барьером. К верхней и нижней стороне частицы подведены пленочные контакты (электроды), при этом боковая поверхность частицы окружена диэлектрическим слоем. Таким образом, протекание тока между электродами возможно только через частицу, перпендикулярно ее слоям, в так называемой CPP геометрии (Current Perpendicular to Plane) (Рисунок 1).

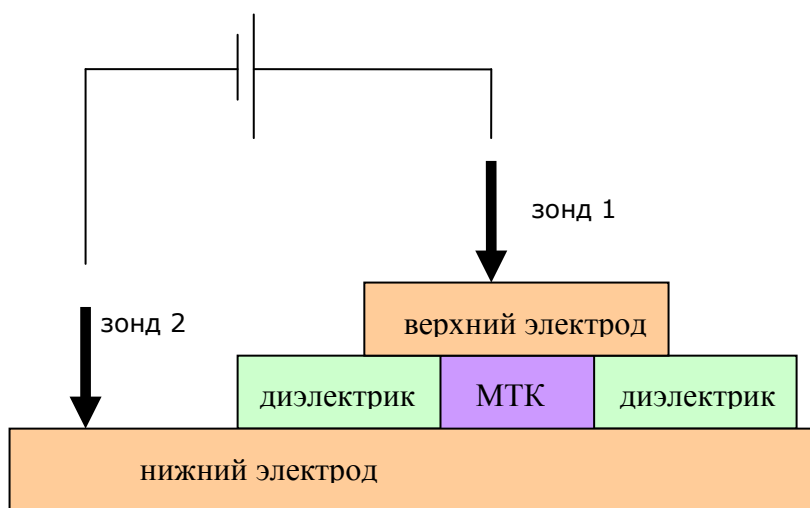


Рисунок 1. Схематическое изображение включения МТК в измерительную цепь.

Магнитные туннельные контакты формировались на стандартных кремниевых пластинах методами электронной литографии из многослойных пленочных структур CoFe(11 нм) / TaO<sub>x</sub>(2 нм) / CoFe(9 нм). Металлические структуры изготавливались методом магнетронного распыления в атмосфере Ag при остаточном давлении в камере ~ 10<sup>-6</sup> Торр.

В едином вакуумном цикле первоначально на подложку наносилась металлическая пленка Ta толщиной порядка 50 нм, выполняющая функции «нижнего» электрода и обеспечивающая хорошую адгезию между подложкой и следующими слоями. На этом слое формировалась многослойная структура CoFe (11 нм) / TaO<sub>x</sub> (2 нм) / CoFe(9 нм). Окисление металлического слоя Ta между магнитными слоями проводилось естественным образом в атмосфере кислорода с давлением порядка 10 Торр в течение 2 мин. Верхний ферромагнитный слой частицы покрывался Cu или другим проводящим материалами (Au или Pt) для обеспечения омического контакта с «верхним» электродом.

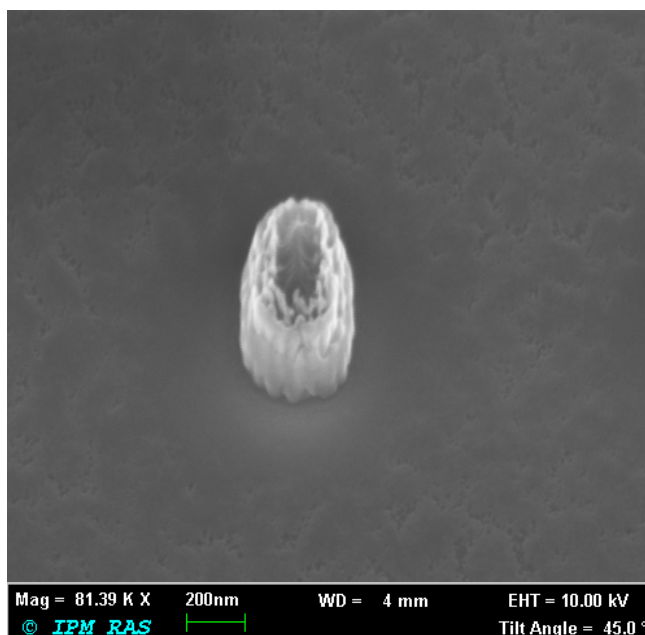


Рисунок 2. SEM изображение МТК на поверхности нижнего электрода после проведения процедуры травления в Ag и до нанесения слоя диэлектрика.

Выбор TaO<sub>x</sub> в качестве туннельного диэлектрического слоя не является оригинальным [3]. Одними из преимуществ при выборе данного материала является то, что прослойка TaO<sub>x</sub> может быть изготовлена в менее жестких технологических условиях, по сравнению с наиболее распространенными туннельным барьером из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или MgO, возможно варьирование толщины прослойки в широком диапазоне (2-5 нм), благодаря меньшей высоте туннельных барьеров [3,4]. Также, в нашем случае Ta был использован как материал подводящего электрода, что уменьшает

количество мишеней, используемых в едином вакуумном цикле. Таким образом, для изготовления МТК с подведенными электродами в едином вакуумном цикле достаточно 3 материалов. Состав и толщины слоев контролировались методами ионной масс-спектрографии (ВИМС) и рентгеновской рефлектометрии. Далее изготовленная структура покрывалась многослойной электронной маской состоящая из полимерных и металлических слоев. Этот составной резист позволяет провести, во-первых, ионное травление ферромагнитных металлических слоев и, во-вторых, “lift-off” процесс для удаления остатков маски.

Для изготовления МТК была разработана процедура одностадийной электронной литографии в сочетании с обычной фотолитографией, используемой для формирования контактных площадок. Был использован фоторезист отечественного производства ФП9120. Особенности этапов электронной литографии с использованием этого материала состояли в следующем. Как и в процессе обычной фотолитографии раствор резиста наносился на центрифуге при скоростях вращения от 3000 до 8000 об/мин. Вязкость раствора фоторезиста можно менять введением в него метил-этилкетона, что позволяет контролируемым образом получать достаточно однородные по толщине слои резиста в диапазоне от 0.1 до ~ 1 мкм на площади в несколько квадратных сантиметров. Сушка нанесенного слоя проводится в воздушной атмосфере при температуре 90 градусов Цельсия. Затем фоторезистивный слой экспонируется ультрафиолетовым излучением ртутной лампы высокого давления до приобретения полимером способности растворяться в 0.5% водном растворе КОН. После этой предварительной засветки выполняется основное экспонирование с использованием электронного пучка. На участках, которые были обработаны электронами, материал резиста почти полностью теряет способность растворяться в условиях, когда идет хорошее растворение в неэкспонированных зонах, что и делает возможным применение таких материалов в качестве негативных электронных резистов.

Для формирования рисунка в электронном резисте использовался электронный микроскоп Supra 50V с литографической приставкой ELPHY PLUS. Первоначально формировался рисунок в верхнем слое резиста, который в дальнейшем передавался в ферромагнитные слои с использованием ионного и плазмохимического травления. В результате на поверхности нижнего электрода была сформирована многослойная частица, см. рисунок 2. Далее весь образец покрывался слоем диэлектрика  $Ta_2O_5$  толщиной порядка 50 нм, формируемом плазмохимическим распылением Ta в атмосфере Ar и  $O_2$ . После этого проводился “lift-off” процесс удаления остатков маски с поверхности магнитных частиц. В результате получалось, что боковая поверхность частицы была окружена диэлектрическим слоем  $Ta_2O_5$ , и ее верхний слой выходит на поверхность, что позволяет присоединить к частице вторую контактную площадку для включения в измерительную цепь (см. рисунок 1).

На заключительном этапе изготовления, методами фотолитографии верхний проводящий слой частицы «расширялся» в контактную площадку, имеющую форму диска с диаметром 400 мкм. По описанной методике было изготовлено несколько образцов. Каждый из образцов содержал порядка 100 МТК, расположенных на кремниевой пластине, объединенных общим нижним электродом, и имеющих индивидуальный верхний электрод.

Для измерения вольтамперных характеристик и магнитосопротивления туннельных магнитных контактов был изготовлен специализированный измерительный стенд. Измерения проводились двухконтактным способом, с использованием нановольтметров Alight 3200 и контрольно-измерительной аппаратуры входящей в состав зондового микроскопа Solver HV (НТ-МДТ). Для включения МТК в измерительную цепь использовались механические манипуляторы, осуществляющие прижим заостренных зондов с подведенными к ним проводами в контактные площадки образца. Процесс прижима контролировался в оптическом микроскопе. Необходимо отметить, что в случае прижимного (механического) контакта зондов к электродам туннельного контакта, образец остается неподвижным, что позволяет стандартными способами защитить контакт от статического пробоя, часто приводящего к разрушению МТК.

Нами представлены результаты измерений двух образцов, различающихся латеральными размерами МТК. Для других образцов, изготовленных в рамках тех же серии образцов, свойства туннельных контактов, практически совпадали.

МТК формировались эллиптической формы с субмикронными размерами 200\*300 нм и 100\*200 нм. Особенностью подобных контактов является то, что ферромагнитные слои частиц связаны между собой через магнитоэлектрическое взаимодействие. Эллиптическая форма частиц, аспектное соотношение и малые субмикронные размеры позволяют управлять анизотропией формы, при этом распределение намагниченности в каждом ферромагнитном слое остается близким к квазиоднородному.

На рисунках 3(а) и 3(б) представлены зависимости изменения сопротивления изготовленных МТК от внешнего магнитного поля, для МТК с латеральными размерами 200\*300 нм и 100\*200 нм, соответственно. В каждом эксперименте магнитное поле прикладывалось вдоль длинной оси эллиптической частицы.

Измерение магнитосопротивления изготовленных структур проводились при комнатной температуре. Удельное сопротивление изготовленных МТК составляло порядка 600 Ом·мкм<sup>2</sup> (сопротивление элемента с латеральными размерами 200\*300 нм составляло порядка 10 кОм). Измерения проводились при пропускании тока порядка в диапазоне 1-50 мкА (падение напряжения 10-500 мВ). Величина магнитосопротивления составляла порядка 3% при падении напряжения 10 мВ и плавно уменьшалась с ростом измерительного тока. Подобные значения магнитосопротивления для прослойки TaO<sub>x</sub> близки к типичным значениям для такого барьера [4].

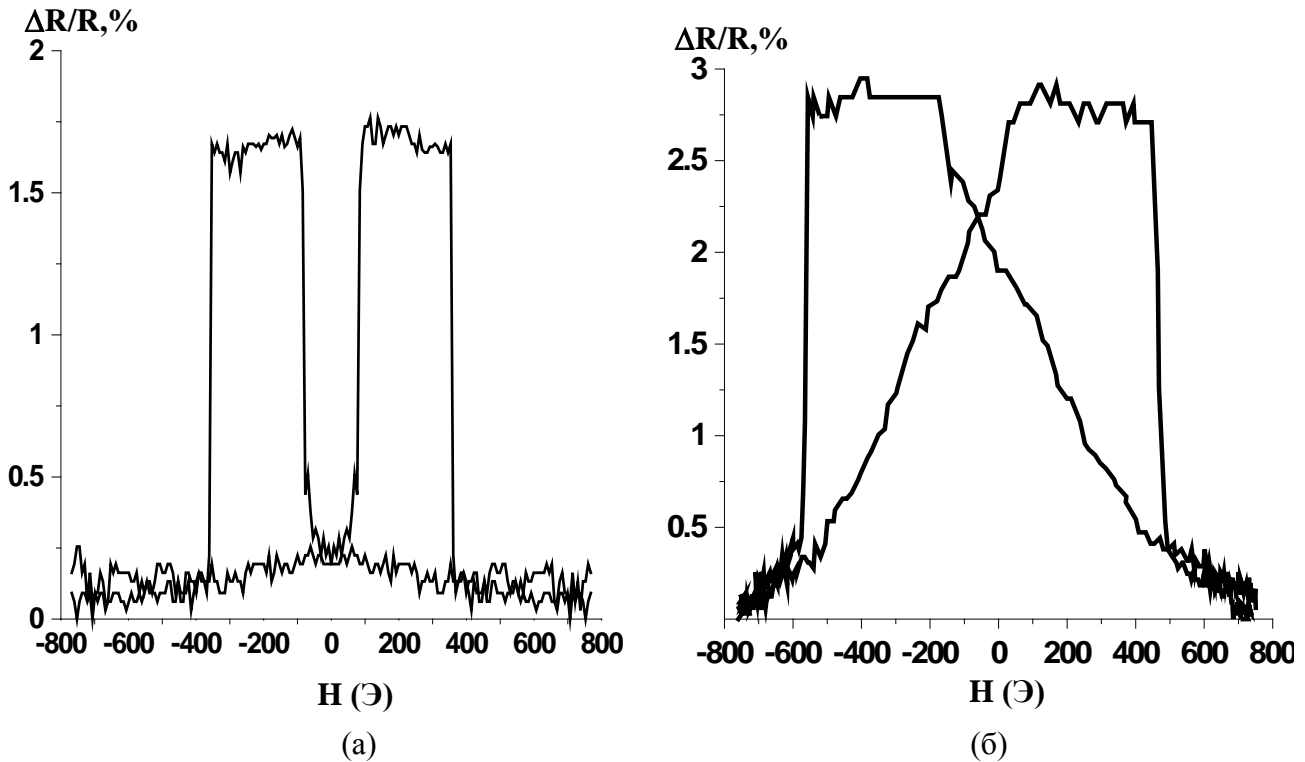


Рисунок 3. Зависимости сопротивления МТК от внешнего магнитного поля для структур размером 100\*200 нм (а) и 200\*300 нм (б) соответственно. Магнитное поле прикладывалось вдоль длинной оси частицы.

Для частиц с размерами 100\*200 нм, т.е. с большим аспектным соотношением наблюдалось только два устойчивых состояния – параллельное и анти параллельное упорядочивание между слоями, как во внешнем магнитном поле, так и без поля, см. рисунок 3(а). Переход между этими состояниями происходил скачком. Для частиц с латеральными размерами 200\*300 нм, т.е. меньшим аспектным соотношением, существуют участки с плавным разворачиванием магнитного момента каждого из слоев, относительно друг друга, известное в англоязычной литературе как “scissor” (“ножницы“) состояние [5], см. рисунок 3(б). Таким образом, можно провести соответствие между кривой намагничивания и наблюдаемой зависимостью сопротивления от внешнего магнитного поля.

Отметим так же, что по описанной методике можно изготавливать МТК с барьером из оксида алюминия, первые эксперименты показали, что может быть достигнуто значение магнитосопротивления величиной порядка 10-15%. Результаты работы представлены в [6]. На основе полученных результатов была подготовлена статья, которая принята к печати в журнале “Известия РАН, Серия физическая” (см. [1] в списке подготовленных к печати статей).



## 2. Расчет структуры смешанного состояния сверхпроводника в периодическом магнитном поле и изучение движения вихревых структур при протекании по сверхпроводнику транспортного тока.

В соответствие с утвержденным планом работ по проекту на данном этапе мы изучили особенности формирования смешанного состояния для сверхпроводящих образцов в неоднородном магнитном поле в рамках феноменологической теории Гинзбурга-Ландау. В качестве источников статического пространственно-модулированного магнитного поля были рассмотрены периодические доменные структуры, изолированные доменные стенки и системы токонесущих проводников (электромагнитов). Для исследования задачи о динамике вихревой структуры в неоднородном магнитном поле было разработано Windows-ориентированное приложение [7] (рисунок 4). Ключевым моментом является то, что амплитуда и конфигурация полей рассеяния, создаваемых такими источниками поля, будет зависеть от внешних источников тока и тем или иным образом может быть изменена в процессе моделирования.

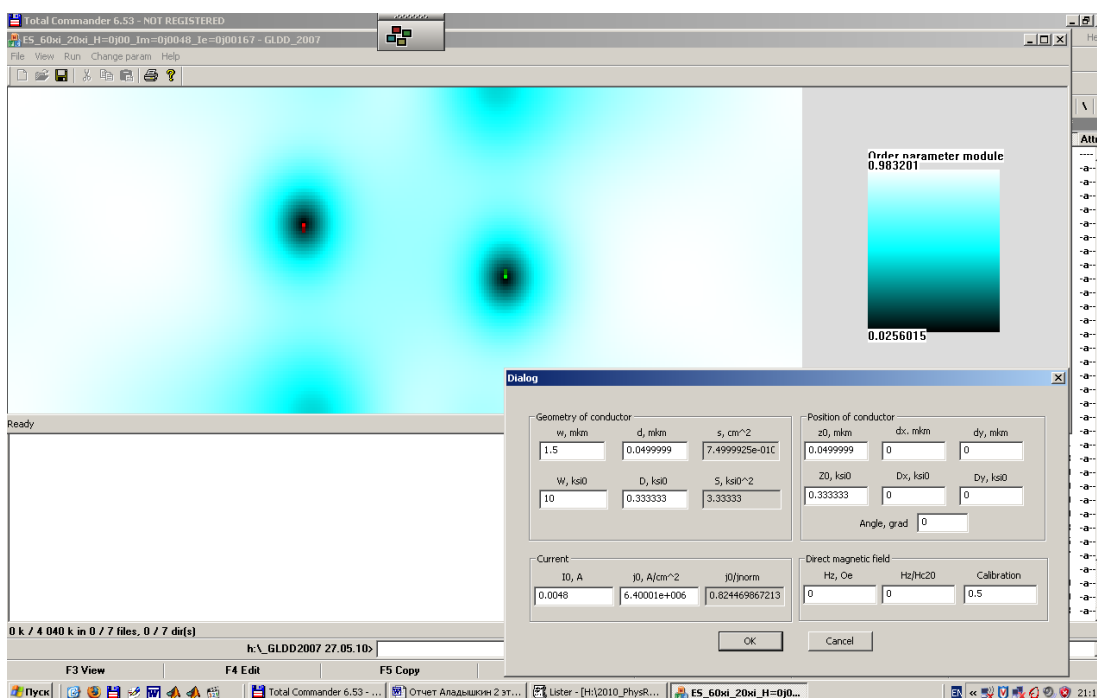


Рисунок 4. Пример работы приложения GLDD2008 и диалоговое окно, позволяющее управлять параметрами неоднородного поля, создаваемого токонесущим проводом.

Для расчета структуры смешанного состояния сверхпроводника в периодическом магнитном поле и изучение движения вихревых структур при протекании по сверхпроводнику транспортного тока была рассмотрена гибридная система сверхпроводящая пленка – ферромагнетик с доменным распределением намагниченности. Предполагалось, что амплитуда

магнитного поля рассеяния  $H_0$ , создаваемого ферромагнетиком в области сверхпроводящей пленки, превышает верхнее критическое поле  $H_{c2}$ , но меньше критического поля разрушения поверхностной сверхпроводимости  $H_{c3}$ . В этом случае гибридная система находится в режиме доменной сверхпроводимости – сверхпроводящие области локализованы вблизи доменных границ. Схематически данная система показана на рисунке 5.

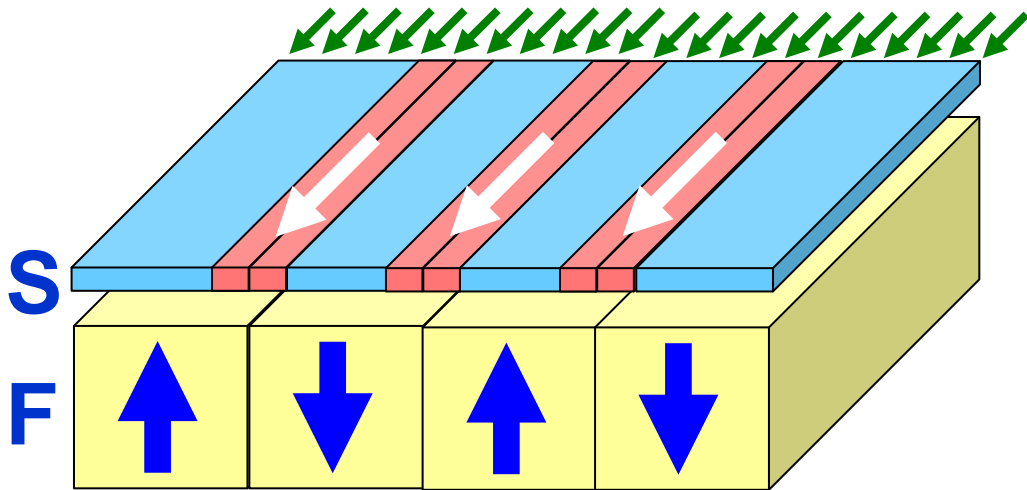


Рисунок 5. Схематическое изображение гибридной системы сверхпроводящая пленка (S) – ферромагнетик с одномерной доменной структурой (F). Синими стрелками показано направление намагниченности в магнитных доменах. Зелеными стрелками показано направление инжектируемого нормального тока. Сверхпроводящий транспортный ток, текущий по квазиодномерным сверхпроводящим каналам, локализованным вблизи доменных границ, показан белыми стрелками.

В случае, когда расстояние между соседними доменными стенками много больше длины когерентности, параметр порядка может быть представлен в виде

$$\psi(x, y) = \sum_n \varphi(x - nd) e^{ik_n y}, \quad (2.1)$$

где  $d$  - расстояние между соседними доменными стенками, вид функция  $\varphi(x)$  не зависит от номера стенки, суммирование производится по всем стенкам. При этом импульсы  $k_n$  отличны от нуля и равны  $k_n = (-1)^n k_0$ , где  $k_0 \approx 3.23 \sqrt{H_0 / \Phi_0}$  ( $\Phi_0 = \pi \hbar c / e$  - квант потока). Различие в импульсах на соседних доменных границах приводит к формированию одномерных цепочек вихрей над доменами с намагниченностью одного знака и антивихрей над доменами с намагниченностью другого знака.

Результаты численных расчетов подтверждают эту гипотезу. На рисунке 6 изображено распределение плотности сверхпроводящего конденсата в магнитном поле, состоящем из суперпозиции поля создаваемого периодической системой магнитных доменов, а также однородного внешнего поля. Темный цвет соответствует областям подавленного параметра порядка в центрах вихрей. Амплитуда периодического магнитного поля равна  $1.625H_{c2}$ , тогда как величина верхнего критического поля существования сверхпроводимости над доменной границей равна  $1.7H_{c2}$ . В отсутствии внешнего магнитного поля цепочки вихрей расположены посередине между доменными стенками и имеют пространственный период  $k_0^{-1} = 2\xi$  (см. рисунок 6(a)). В приложенном однородном магнитном поле концентрация вихрей и антивихрей становится различной. В этом случае расстояние между вихрями в соседних доменах становится различным, зависящим от величины внешнего поля (см. рисунок 6(b)).

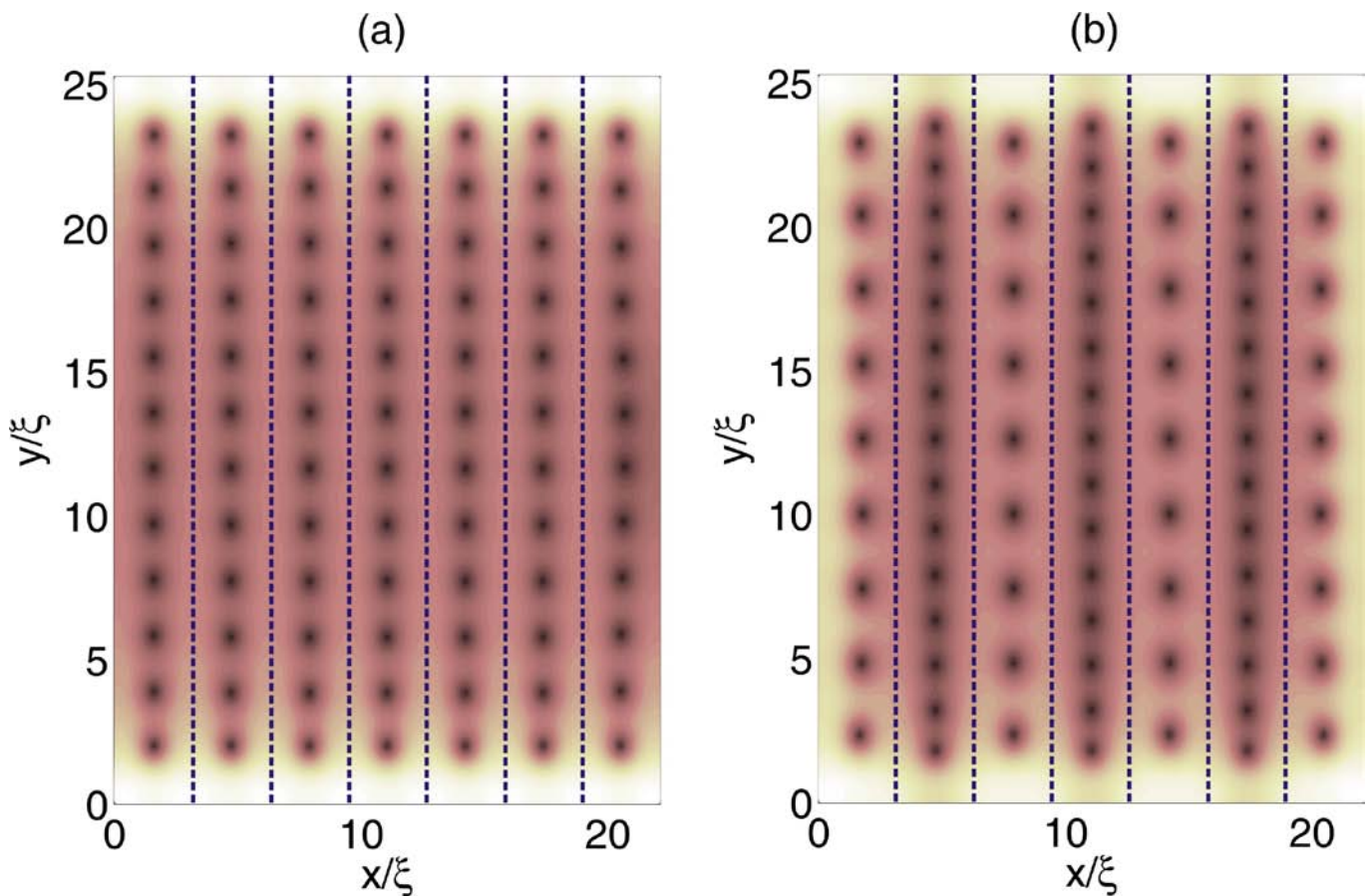


Рисунок 6. Расположение вихрей в магнитном поле, состоящем из суперпозиции поля создаваемого периодической системой магнитных доменов, а также однородного внешнего поля. Положение границ между доменами показано пунктирными линиями. (a) Внешнее поле отсутствует. (b) Внешнее поле равно  $0.25H_{c2}$ .

Для мезоскопических сверхпроводящих мостиков с амплитудой неоднородной компоненты поля  $B_0=0$  была исследована структура смешанного состояния и описана трансформация вихревой

решетки при  $|H| < H_{c2}$  в цепочку вихрей при  $H_{c2} < |H| < H_{c3}$  (где  $H_{c2} = \Phi_0 / 2\pi\xi(T)^2$  – верхнее критическое поле,  $H_{c3} = 1.69H_{c2}$  – критическое поле поверхностной сверхпроводимости,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока, рисунок 7). Под мезоскопическими сверхпроводниками мы понимаем тонкопленочные образцы с латеральными размерами  $L_x$  и/или  $L_y$  порядка нескольких длин когерентности  $\xi$ . Для полей  $H$  вплоть до поля  $H_{c3}$  получена зависимость критического тока мостика  $I_c$  от температуры  $T$  и внешнего магнитного поля  $H$ .

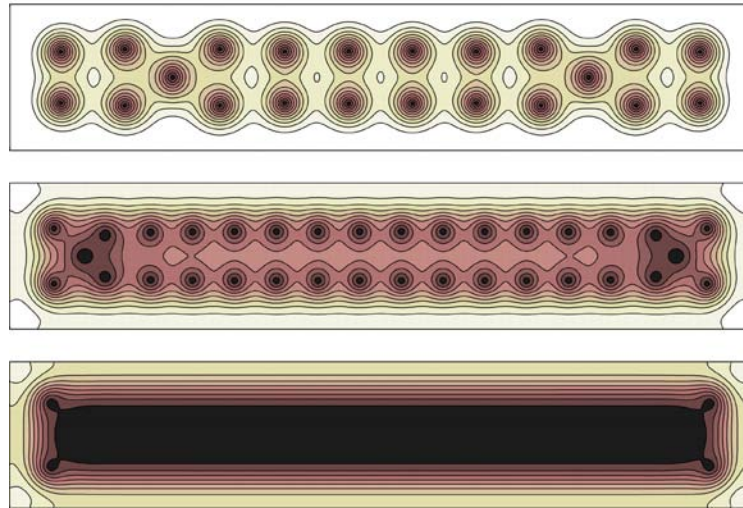


Рисунок 7. Равновесные вихревые структуры в сверхпроводящих мостиках размером  $4\xi_0 \times 8\xi_0$  в однородном магнитном поле при  $T=0$ :  $H/H_{c2}^{(0)} = 0.6, 0.9$  и  $1.2$  (сверху вниз),  $\xi_0$  – длина когерентности при  $T=0$ ,  $H_{c2}^{(0)} = \Phi_0 / 2\pi\xi_0^2$ .

Наличие прямолинейной доменной стенки в ферромагнитной подложке (т.е. амплитуда неоднородной компоненты поля  $B_0 \neq 0$ ) существенно изменяет сверхпроводящие свойства мезоскопических образцов. Было показано, что при понижении температуры локализованная сверхпроводимость при  $|H| \ll B_0$  сначала возникает вблизи точек пересечения доменной стенки и края образца (прикраевая доменная сверхпроводимость, рисунок 8). Очевидно, что для поля вида  $B_z = B_0 \text{sgn}(y)$  задача о появлении такого зародыша эквивалентна задаче о зарождении сверхпроводимости вблизи вершины сверхпроводящего клина с углом  $90^\circ$ . Определена область существования локализованных решений на диаграмме  $H$ - $T$  и исследована трансформация локализованных и делокализованных решений разных типов при изменении  $H$  и  $T$ . Показано, что даже для мезоскопических образцов критическая температура изменяется монотонно при изменении  $H$  без осцилляций Литтла-Паркса (рисунок 9).

Было показано, что локализованные прикраевые решения вблизи доменной стенки при понижении температуры становятся делокализованными и обеспечивают формирование

непрерывного сверхпроводящего канала над доменной стенкой даже тогда, когда доменная сверхпроводимость в образце без границ является энергетически невыгодной. Мы исследовали транспортные свойства сверхпроводящих каналов, идущих вдоль доменных стенок или над доменами с компенсированным полем, и установили, что неподвижность вихревых структур нарушается, если сторонний ток превышает некоторое критическое значение. В соответствии с утвержденным планом работ решение задачи о критическом токе сверхпроводящих каналов, индуцированных в мезоскопических сверхпроводниках доменными стенками, будет выполнено на следующем этапе.

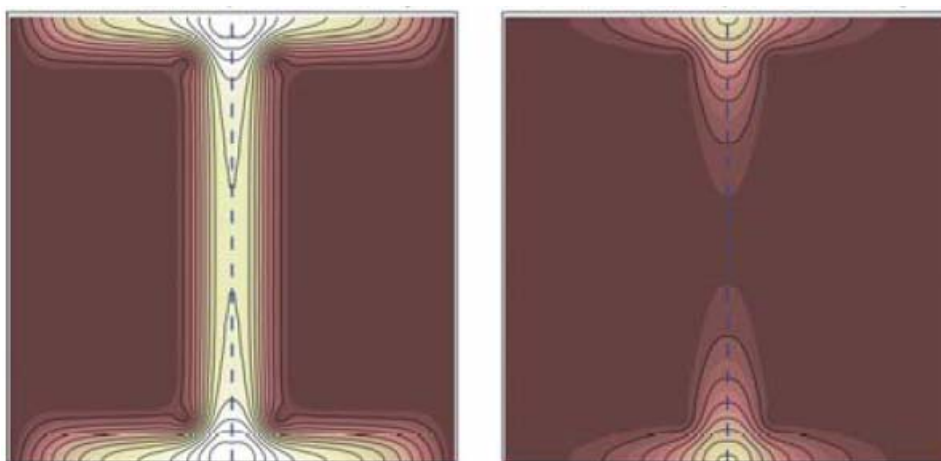


Рисунок 8. Локализованная сверхпроводимость в мезоскопических сверхпроводниках в неоднородном магнитном поле: прикраевая сверхпроводимость и доменная сверхпроводимость (слева,  $B_0=1.5H_{c2}^{(0)}$ ); прикраевая доменная сверхпроводимость (справа,  $B_0=1.85H_{c2}^{(0)}$ ). Размер образца  $20\xi_0 \times 20\xi_0$ .

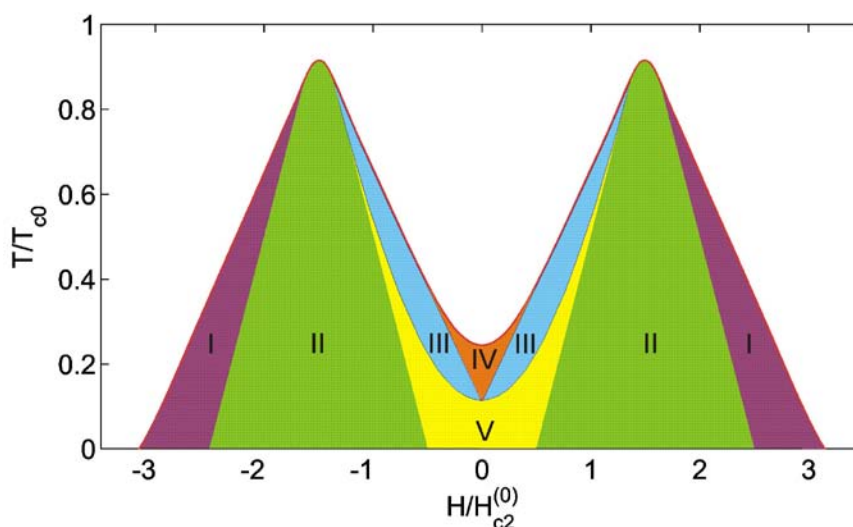
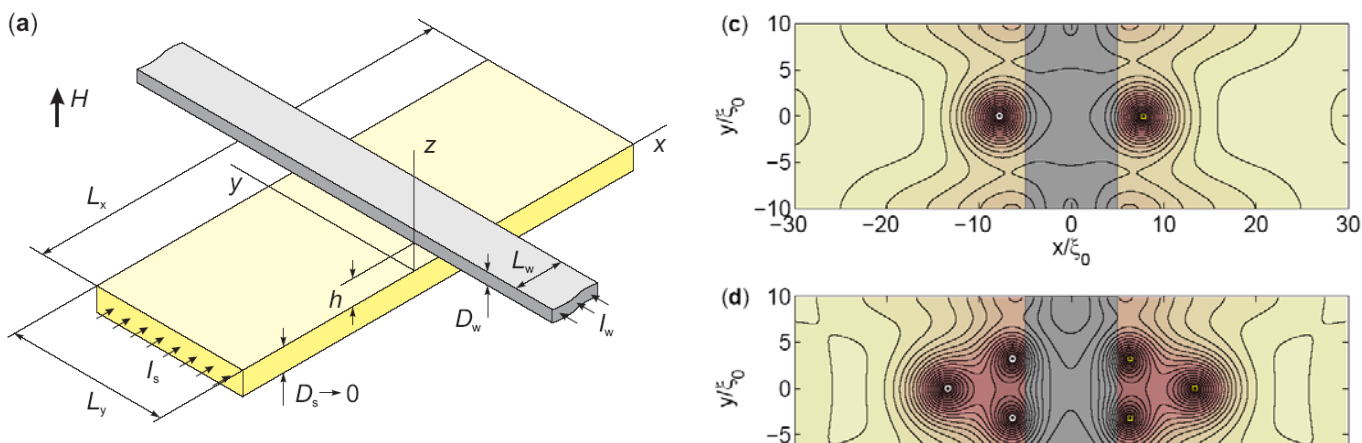


Рисунок 9. Схематичное представление различных областей существования локализованных и делокализованных сверхпроводящих состояний в тонкопленочном образце размером  $20\xi_0 \times 20\xi_0$  в

неоднородном магнитном поле вида  $B_z = H + B_0 \text{sgn}(y)$ ,  $B_0 = 1.5H_{c2}^{(0)}$ : I – прикраевая сверхпроводимость в областях с компенсированным магнитным полем (т.е. над магнитными доменами с обратной полярностью), II – объемная компенсированная сверхпроводимость над обратными доменами, III – прикраевая сверхпроводимость, IV – прикраевая доменная сверхпроводимость, V – комбинированная прикраевая и доменная сверхпроводимость.

Кроме этого, было изучено формирование смешанного состояния в сверхпроводящем мостике в поле токнесущего провода с током, ориентированного перпендикулярно сверхпроводящему мостику (рисунок 10(a)). Профиль перпендикулярной z-компоненты магнитного поля представлен на рисунке 10(b). Как известно, поле рассеяния изолированной доменной стенки на больших расстояниях эквивалентно полю, создаваемому проводом с током. Вследствие этого, гибридную систему «сверхпроводник-провод с током» можно рассматривать как аналог гибридной структуры сверхпроводник-ферромагнетик с изолированной доменной стенкой и изменяемой величиной остаточной намагниченности ферромагнетика. Легко видеть, что для рассматриваемого случая магнитное поле однородно по ширине мостика (вдоль провода) и сильно неоднородно в перпендикулярном направлении, достигая максимума вблизи краев токнесущего провода. Постепенное увеличение силы тока в проводе вызывает увеличение локального магнитного поля и, соответственно, подавление энергетического барьера для входа вихрей с краев сверхпроводящего мостика. Если сила тока в проводе  $I_w$  превысит некоторую критическую величину, то мейсснеровское (безвихревое) состояние разрушается и формируется равновесная вихревая структура, состоящая из вихрей и антивихрей, рисунок 10(c-d). Как и следовало ожидать, число пар вихрь-антивихрь увеличивается с увеличением  $I_w$ . Отметим, что поле провода с током действует как источник вихрей и антивихрей и как магнитная ловушка, удерживающая вихри и антивихри от взаимной аннигиляции.



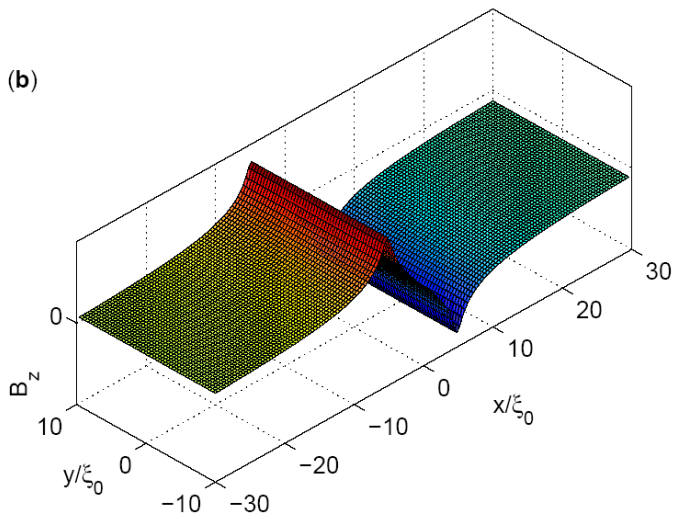


Рисунок 10. (а) Схематичное представление гибридной системы, состоящей из сверхпроводящего мостика и прямолинейного провода с током. (b) Профиль z-компоненты магнитного поля провода с током,  $\xi_0$  – длина когерентности при  $T=0$ . (с-d) Равновесные вихревые структуры, возникающие в сверхпроводящем образце размером  $60\xi_0 \times 20\xi_0$  в поле прямого провода с током, ток провода  $I_w=5$  мА (с), ток провода  $I_w=8$  мА (d).

Результаты исследований опубликованы в работах [7-10].

### 3. Расчет величины критического тока перехода в резистивное состояние для планарной системы сверхпроводник - ферромагнетик с одномерной доменной структурой и системы сверхпроводник – решётка магнитных наночастиц, в зависимости от направления тока по отношению к магнитным доменам в присутствии внешнего магнитного поля.

В соответствие с утвержденным планом работ по проекту на данном этапе мы изучили особенности перехода сверхпроводящих образцов в резистивное состояние при наличии статического неоднородного магнитного поля. В данном пункте мы обсудим особенности зависимости критического тока  $I_c$  от полярности измерительного тока и величины неоднородной компоненты магнитного поля для гибридных структур следующих типов:

- а) сверхпроводящий мостик в поле изолированной доменной стенкой, ориентированной параллельно току;
- б) сверхпроводящий мостик в поле токнесущего провода с током, ориентированным перпендикулярно сверхпроводящему мостику;
- в) сверхпроводящий мостик в поле магнитомягких частиц, дипольный момент которых может быть переориентирован под действием внешнего магнитного поля.
- г) сверхпроводящий мостик в поле магнито жестких частиц, дипольный момент которых может быть переориентирован под действием внешнего магнитного поля.

Рассмотрим подробно эти частные случаи.

- а) сверхпроводящий мостик в поле изолированной доменной стенкой, ориентированной параллельно току:

Поскольку магнитное поле, индуцированное периодической доменной структурой в кристаллах феррита бария  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , зависит в основном от одной координаты, то такие системы очень удобны для изучения транспортных свойств S/F структур и исследования угловой зависимости критического тока [11-13]. С помощью электронно-лучевой литографии был изготовлен алюминиевый мостик крестообразной формы (толщиной 50 нм и шириной 30 мкм), который располагался над одной из прямолинейных доменных стенок (рисунок 11). Амплитуда модуляции поля магнитных доменов ( $B_0 \sim 500$  Г) существенно превышает верхнее критическое по  $x$   $H_{c2}^{(0)} \sim 200$  Э при  $T=0$ ),  $B_0/H_{c2}^{(0)} > 2.5$ . Поэтому сверхпроводимость в такой системе возникает только во внешнем поле над доменами с компенсированным полем (т.е. над магнитными доменами с  $z$ -компонентой намагниченности противоположного знака по отношению к  $H$ , так называемый режим поддоменной возвратной сверхпроводимости). Было



обнаружено, что сопротивление S/F структуры уменьшается до нуля только для тока, текущего вдоль доменных стенок (рисунок 12). В то же время транспортный ток, инжектируемый перпендикулярно доменным стенкам, не может течь без сопротивления, т.к. ток вынужден пересекать области с подавленной сверхпроводимостью, обладающие нормальным удельным сопротивлением. Как следствие, сопротивление сверхпроводящего мостика становится сильно анизотропным:  $\min R_{\perp}/\min R_{\parallel} > 10^3$  (где  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$  – сопротивление системы при инжекции транспортного тока перпендикулярно и параллельно доменным стенкам). Мы исследовали процесс формирования сверхпроводящих каналов в широком интервале температур и магнитных полей и получили оценки соответствующего критического тока (рисунок 13).

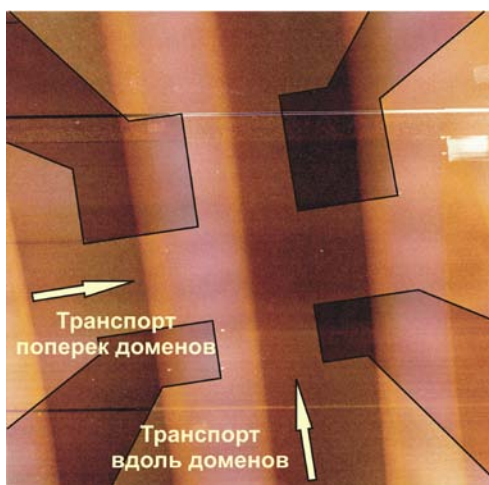


Рисунок 11. Комбинированное магнитосиловое (MFM) и атомносиловое (AFM) изображение исследуемой структуры: темные и светлые полосы представляют собой магнитные домены в кристалле  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , черная сплошная линия указывает края сверхпроводящего Al мостика. Ширина магнитных доменов и ширина мостика одинаковы и равны 30 мкм.

Экспериментально была обнаружена выраженная асимметрия вольт-амперных характеристик сверхпроводящих микромостиков при инжекции тока вдоль доменной стенки и при  $|H| \approx B_0$  [13]. Асимметрия проявляется в виде значительной разницы критических токов  $I_c^{(+)}$  и  $I_c^{(-)}$ , текущих в «прямом» и «обратном» направлениях, при этом отношение  $I_c^{(+)}/I_c^{(-)}$  зависит как от величины внешнего поля, так и от его знака (рисунок 13). Такое увеличение критического тока может быть связано с формированием (в области с полностью компенсированным магнитным полем) узкого безвихревого канала, который и обеспечивает перенос большей части сверхпроводящего тока. В то же время выраженной асимметрии вольт-амперных характеристик для случая инжекции стороннего тока перпендикулярно доменным стенкам не обнаружено.

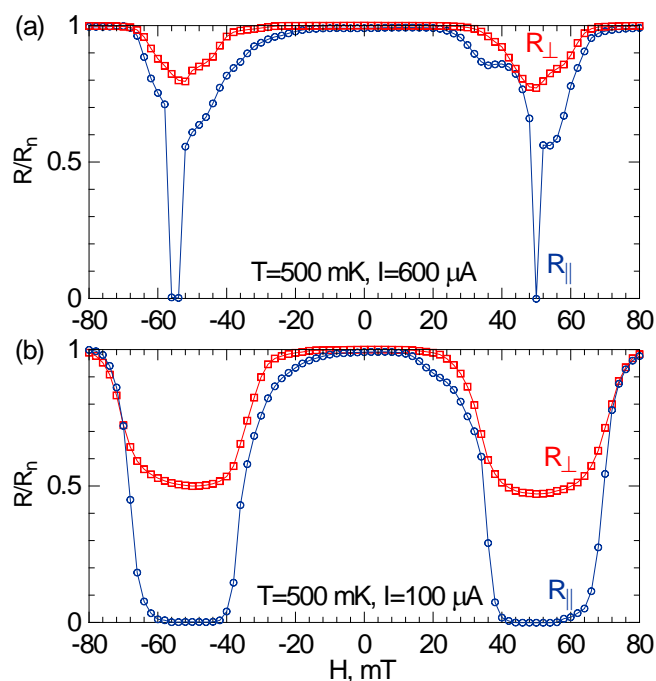


Рисунок 12. Зависимость сопротивления структуры Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> при инжекции тока параллельно ( $R_{\parallel}$ ) и перпендикулярно ( $R_{\perp}$ ) доменным стенкам от внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно сверхпроводящей пленки.

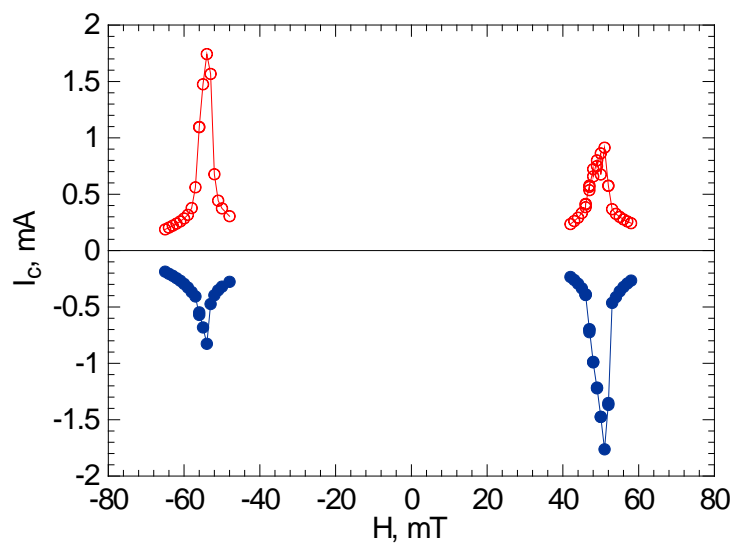


Рисунок 13. Зависимость критического тока  $I_c$  гибридной структуры Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> от приложенного магнитного поля  $H$  для разных знаков стороннего тока.

б) сверхпроводящий мостик в поле токнесущего провода с током, ориентированным перпендикулярно сверхпроводящему мостику

Формирование вихревых структур в мезоскопических планарных криотронах (т.е. в сверхпроводящих мостиках с поле токонесущего провода) было описано в п. 3.2. Термин «криотрон» был введен Д. Баком [14] в 1956 г. для описания сверхпроводящего переключателя тока, состоящего из сверхпроводящего провода и управляющей обмотки (электромагнита). Ранее было показано, что подача достаточно сильного тока в цепь управляющего соленоида, намотанного вокруг сверхпроводящего провода, может создать достаточно сильное магнитное поле и полностью подавить сверхпроводимость в управляемом проводе. Это приведет к резкому переключению сверхпроводящего провода из низко- в высокорезистивное состояние даже при незначительном изменении силы тока в управляющем соленоиде. Позднее было показано, что на основе криотронов можно создать логические элементы (например, вентили "И" и "ИЛИ", сумматоры, сдвиговые регистры и т.п.), которые могут быть использованы при построении сверхпроводящего компьютера. Однако для уменьшения диапазона рабочих токов и времен переключения необходимо было уменьшать размеры криотронов, что было невозможно при технологических возможностях в 60-е и 70-е годы XX века.

В ходе решения задач проекта мы рассмотрели свойства мезоскопических криотронов, для которых ширина сверхпроводящего мостика сравнима с длиной когерентности [9-10]. Было показано, что область вблизи управляющего провода, в которой локализованы вихри и антивихри, играет роль слабой связи. В самом деле, под действием транспортного тока  $I$  в сверхпроводящем мостике запиннигованные вихри и антивихри могут прийти в перманентное движение, что будет основным источником диссипации энергии в рассматриваемой системе. Иными словами, переход от стационарного к нестационарному режиму при достижении некоторого критического значения протекающего тока  $I_c$  соответствует переходу криотрона в резистивное состояние. Обнаружено, что критический ток  $I_c$  сверхпроводящего мостика зависит от типа вихревой структуры, которая очевидно зависит от  $I_w$  и  $B_0$  (рисунок 14). Действительно, суперпозиция экранирующих токов и инжектируемого тока облегчает условия для входа вихрей, поэтому диссипация энергии начинается тем раньше, чем больше  $I_w$ . Однако, как только управляющий ток будет достаточно большим для рождения первой пары вихрь-антивихрь, а транспортный ток достаточно малым, пара вихрь-антивихрь сможет закрепиться в образце. Как следствие, запиннигованные вихри могут снизить плотность тока вблизи локальных максимумов и, тем самым, закрыть канал для входа новых вихрей. Такое состояние, как видно из наших расчетов, соответствует локальному минимуму критического тока. Дальнейшее монотонное увеличение  $I_w$  приведет к последовательной стабилизации второй, третьей и последующих пар вихрь-антивихрь, что соответствует регулярным минимумам и максимумам на зависимости  $I_c(I_w)$ . Обнаруженное осцилляторное поведение критического тока во многом аналогично осцилляциям критического тока джозефсоновского перехода во внешнем магнитном поле.

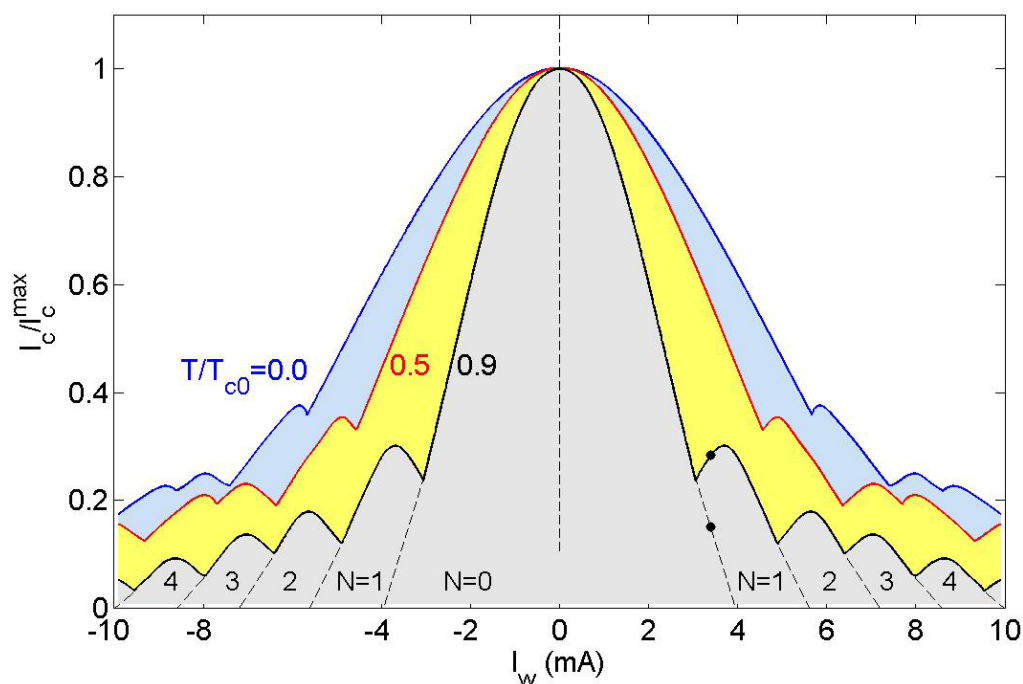


Рисунок 14. Зависимости критического тока мезоскопического криотрона  $I_c$  от тока в управляющем проводе  $I_w$ , рассчитанные в рамках модели Гинзбурга-Ландау в отсутствие внешнего магнитного поля. Для каждого участка диаграммы указано число  $N$  захваченных пар вихрь-антивихрь.

Для проверки указанного эффекта была изготовлена серия образцов, состоящих из сверхпроводящего мостика Al (толщина 120 нм, ширина 4 мкм) и токнесущего провода Nb (толщина 50 нм, ширина 1.5 мкм), см. рисунок 15. Два сверхпроводящих элемента были разделены изолирующим 120 нм слоем Ge для предотвращения электрического контакта. Вольтамперные характеристики мостика исследовались при заданной температуре по стандартной четырехзондовой схеме. Критический ток определялся согласно критерию 1 мкВ. На рисунке 16 представлены зависимости критического тока  $I_c$  сверхпроводящего Al мостика от управляющего тока  $I_w$  в токнесущем проводе, измеренные при  $H=0$  и температурах близких к критической температуре  $T_{c0}=1.27$  К. Плато при малых значениях управляющего тока может быть связано с влиянием дефектов. Действительно, наличие областей с подавленными сверхпроводящими свойствами или геометрических дефектов может привести к формированию пар вихрь-антивихрь при меньших значениях транспортного тока, чем плотность тока распаривания. При больших значениях управляющего тока мы наблюдали периодические осцилляции критического тока. Период осцилляций  $\Delta I_w = 1.45$  мА по нашим оценкам соответствует такому изменению поля

провода с током, что изменение потока магнитного поля через половину площади образца составляет  $1.1\Phi_0$ , где  $\Phi_0$  – квант магнитного потока.

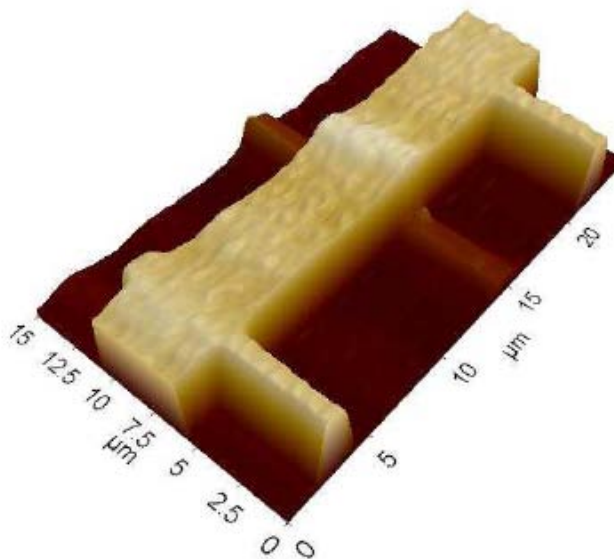


Рисунок 15. Атомно-силовое изображение исследуемой структуры (AFM), верхний (светлый) электрод соответствует сверхпроводящему Al мостику.

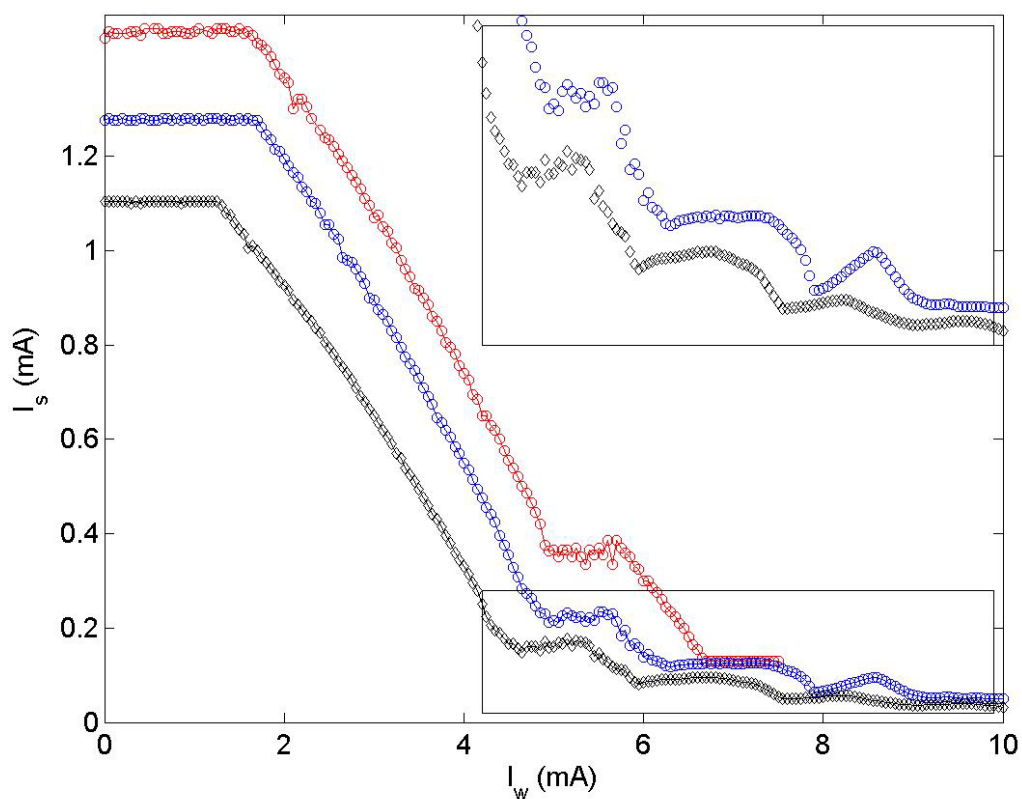


Рисунок 16. Осцилляции критического тока мезоскопического криотрона, измеренные при  $T=1.12$  К, 1.14 К, 1.16 К (сверху вниз) и  $H=0$ . Вставка изображает увеличенный участок зависимости  $I_c(I_w)$ .

Мы полагаем, что обнаруженный эффект может быть интересен для создания интерферометров на основе гибридных структур сверхпроводник-электромагнит и сверхпроводник-ферромагнетик.

в) сверхпроводящий мостик в поле магнитомягких частиц, дипольный момент которых может быть переориентирован под действием внешнего магнитного поля.

В рамках проекта, на основе численного решения нестационарных уравнений Гинзбурга-Ландау, был также вычислен критический ток перехода в резистивное состояние гибридной системы мезоскопический сверхпроводник – цепочка магнитомягких диполей, помещённой в однородное внешнее магнитное поле. Диполи описывались в рамках подхода Ландау-Лифшица в предположении, что характерное время релаксации магнитной подсистемы существенно меньше характерного времени релаксации сверхпроводящей подсистемы. Магнитостатическое взаимодействие между диполями не учитывалось. Получено, что критический ток является анизотропным (относительно смены направления тока) и степень анизотропии существенно зависит от ориентации магнитных диполей относительно инжектируемого тока, так и от величины внешнего магнитного поля. Для ориентации диполей параллельно направлению транспортного тока (чёрная пунктирная линия на рисунке 17) анизотропия критического тока отсутствует, тогда как для случая ориентации диполей перпендикулярно направлению транспортного тока анизотропия критического тока становится существенной и для определенных значений внешнего магнитного поля отношение значений критического тока для разных направлений становится больше 1.6 (синяя сплошная и красная пунктирная линии на рисунке 17). В такой существенной разнице значений критического тока для разных направлений важную роль играет факт переориентации магнитомягких диполей во внешнем магнитном поле: создаваемое диполями неоднородное поле рассеяния для одного направления тока способствует закреплению вихрей под диполями. Подобная сильная анизотропия критического тока свидетельствует о несимметричности вольт-амперной характеристики, что должно проявляться в нелинейных электродинамических свойствах описываемой системы, и в частности, в эффекте выпрямления переменного тока.

г) сверхпроводящий мостик в поле магнито жестких частиц, дипольный момент которых не может быть переориентирован под действием внешнего достаточного слабого магнитного поля.

Кроме того, в рамках проекта, на основе численного решения нестационарных уравнений Гинзбурга-Ландау была изучена динамика вихрей-антивихрей в гибридных структурах, состоящих

из сверхпроводника конечного размера с жестко-намагниченными магнитными диполями на поверхности, в присутствии транспортного тока [21]. Динамика пар вихрь-антивихрь (генерируемых магнитным полем диполя) проанализирована для различных углов между направлением магнитного момента диполей (лежащего в плоскости сверхпроводника) и направлением транспортного тока. Конкуренция притягивающего взаимодействия в парах вихрь-антивихрь и силы Лоренца со стороны транспортного тока, стремящейся разделить вихри, приводит либо к сепарации вихрей и их движению в противоположных направлениях, либо к их аннигиляции. Мы обнаружили критический угол  $\alpha_c$  (зависящего от размеров образца и величины магнитного момента диполя) между током и направлением магнитного момента, меньше которого вихри и антивихри отталкиваются, а при больших углах притягиваются и аннигилируют. В случае одиночного магнитного диполя такое управление движением вихрей с помощью магнитного диполя также зависит от размеров сверхпроводника, из-за взаимодействия (притяжения) вихрей с границам образца. В периодической решетке магнитных диполей движение вихрей (антивихрей) определяется в основном взаимодействием пар вихрь-антивихрь между собой. Мы также рассчитали критический ток ( $I_c$ ) сверхпроводника при наличии одиночного магнитного диполя, находящегося над сверхпроводником. Оказалось, что величина  $I_c$  сильно зависит от ориентации диполя относительно направления течения тока (в расчетах было рассмотрено несколько значений угла  $\alpha$  (0, 45, 90, 135, 180)). Наибольший критический ток достигается при  $\alpha=135$ , а наименьший при  $\alpha=0$ . Эти результаты могут быть объяснены взаимодействием вихрей с током, созданным магнитным диполем, транспортным током и взаимодействием вихрей с границами образца.

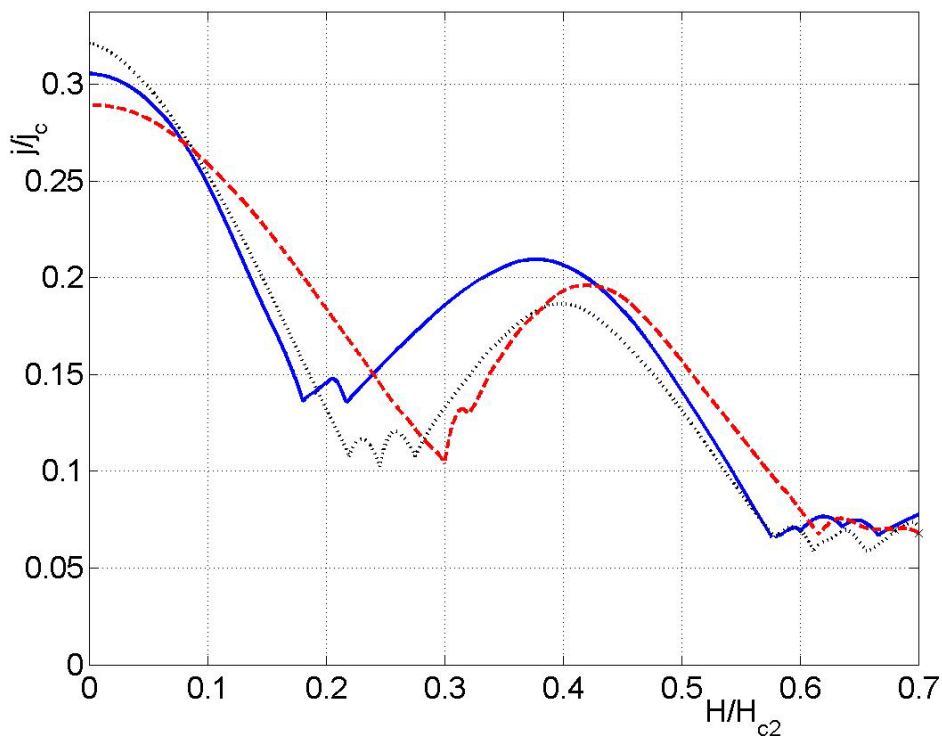


Рисунок 17. Критическая плотность тока перехода в резистивное состояние ( $j$ ) гибридной системы мезоскопический сверхпроводник – цепочка магнитномягких диполей как функция напряженности внешнего однородного магнитного поля ( $H$ ). Размеры сверхпроводящей плёнки  $20 \times 10 \xi_0$  ( $\xi_0$  – длина когерентности при температуре  $T=0$ ). Над плёнкой расположена цепочка из трёх магнитномягких диполей с магнитным моментом  $M = I H_{c2}^{(0)} \xi_0^3$  и параметром анизотропии  $k_a = -1$  ( $H_{c2}^{(0)}$  – верхнее критическое магнитное поле сверхпроводника). Расстояние между диполями  $5\xi_0$ . Синяя сплошная линия – критическая плотность тока для случая ориентации диполей перпендикулярно направлению транспортного тока (вектора тока, магнитного момента и внешнего магнитного поля составляют правую тройку). Красная штриховая линия – диполи ориентированы перпендикулярно направлению транспортного тока, ток направлен в обратную сторону. Чёрная пунктирная линия - случай ориентации диполей параллельно направлению транспортного тока.

Результаты исследований данного пункта были опубликованы в работах [8,9,12,13,15].



**4. Расчет условий существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих металлических проволоках в зависимости от времени релаксации неравновесной функции распределения квазичастиц, длины проволоки и приложенного магнитного поля при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода.**

В рамках работ по данному пункту государственного контракта были рассчитаны вольтамперные характеристики (ВАХ) коротких и длинных сверхпроводящих нанопроволок. Это позволило установить условия существования динамического процесса проскальзывания фазы, приводящего к конечному сопротивлению сверхпроводника. Оказалось, что динамический процесс проскальзывания фазы существует в квазиодномерных сверхпроводниках пока время изменения модуля параметра порядка  $\tau_{|\Delta|}$  (зависящее от длины проволоки, неупругого времени релаксации неравновесных квазичастиц и температуры) больше, чем время изменения разности фаз сверхпроводящего параметра порядка  $\tau_{\delta\phi}$  (зависящего только от температуры и приложенного тока). При этом данный результат остается качественно справедливым как в локальном, так и нелокальном пределах, когда неупругая длина релаксации неравновесных квазичастиц  $L_{in}=(D\tau_{in})^{1/2}$  оказывается меньше, или соответственно больше, чем температурно-зависящая сверхпроводящая длина когерентности  $\xi(T)$  (где  $D$  коэффициент диффузии и  $\tau_{in}$  неупругое время релаксации неравновесных квазичастиц).

На рисунке 18 представлены ВАХ, посчитанные в локальном пределе при различных значениях  $\tau_{in}$  и длин проволоки ( $L \ll \xi(T)$  и  $L \gg \xi(T)$ ). Оказалось, что наличие или отсутствие гистерезиса ВАХ связано с наличием единственного параметра

$$\frac{\tau_{|\Delta|}}{\tau_{\delta\phi}} = \begin{cases} \tilde{\tau}_{in} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \left(\frac{L}{\xi(T)}\right)^2 \frac{I}{I_c}, L \ll \xi(T) \\ \tilde{\tau}_{in} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \frac{L_E}{\xi(T)} \frac{I}{I_c}, L \gg L_E \gg \xi(T) \\ \tilde{\tau}_{in} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \frac{L}{\xi(T)} \frac{I}{I_c}, L \gg L_E \gg \xi(T) \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $L_E = \tilde{\tau}_{in}^{1/2} \xi_0 / (1 - T/T_c)^{1/4}$  глубина проникновения электрического поля в сверхпроводник. Когда отношение  $\tau_{|\Delta|}/\tau_{\delta\phi} > 1$ , то вольтамперные характеристики являются гистерезисными и

динамический процесс проскальзывания фазы прекращается только при  $I_r < I_c$  (где  $I_c$  критический ток перехода из сверхпроводящего в резистивное состояние). При параметрах представленных на рисунке 18(a) отношение  $\tau_{|\Delta|}/\tau_{\delta\phi}$  становится больше единицы только при  $\tilde{\tau}_{in} > 50$  и при меньших значениях  $\tilde{\tau}_{in}$  вольтамперные характеристики являются обратимыми (безгистерезисными).

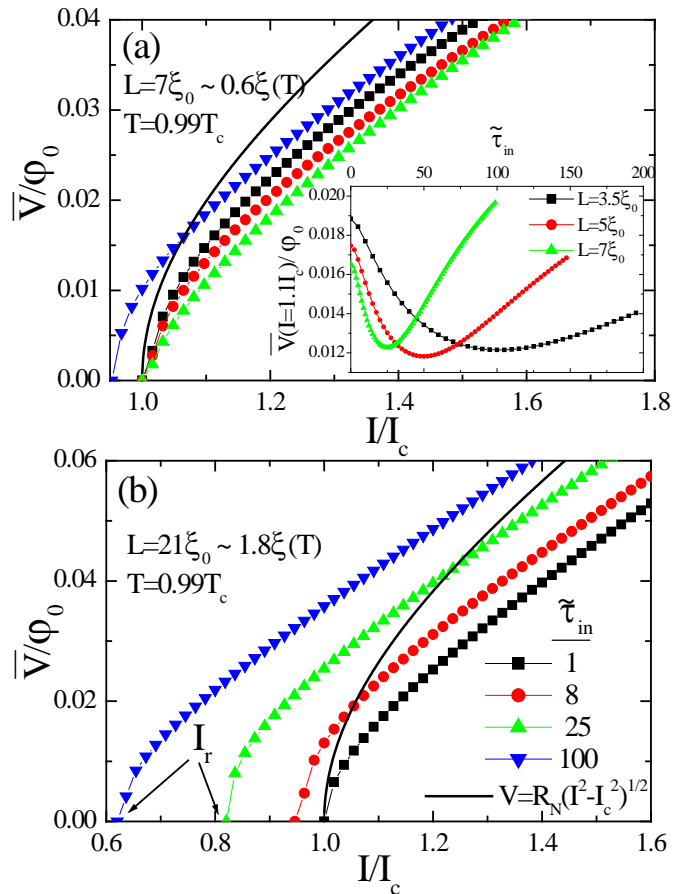


Рисунок 18. Вольт-амперные характеристики короткой (а) и длинной (б) сверхпроводящей проволоки (мостика) рассчитанные на основе численного решения нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау в локальном пределе. На вставке к рисунку (а) представлена зависимость напряжения при фиксированном токе в зависимости от неупругого времени  $\tau_{in}$  приведенного здесь в безразмерных единицах ( $\tilde{\tau}_{in} = 1.76k_B T_c \tau_{in} / \hbar$ ).

Качественно похожие результаты получаются и в нелокальном пределе. На рисунках 19-20 представлены вольтамперные характеристики, полученные на основе численного решения уравнения Узаделя (необходимого для нахождения спектральных функций), уравнения Больцмана (необходимого для нахождения пространственной и временной зависимости квазичастичной

функции распределения квазичастиц) и нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау с дополнительными “неравновесными” членами (см. уравнения (1-5) в [16]).

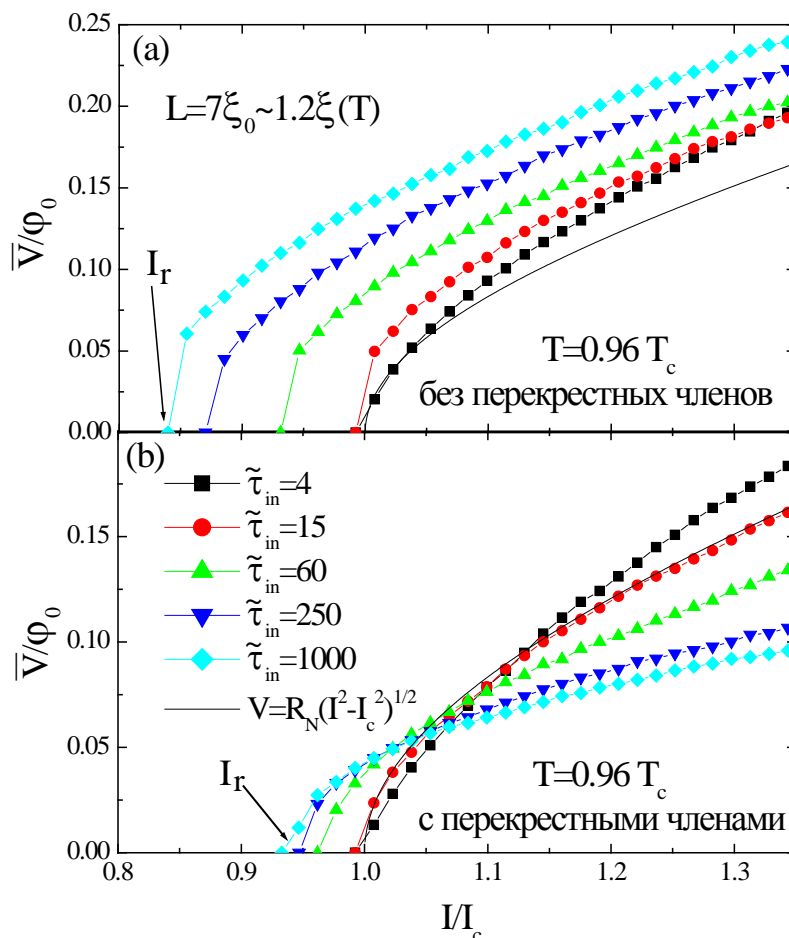


Рисунок 19. Вольт-амперные характеристики короткой сверхпроводящей проволоки (мостика) рассчитанные на основе численного решения нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау в нелокальном пределе. Результаты получены при наличии и отсутствии перекрестных членов в кинетических уравнениях.

В нелокальном пределе мы также обнаружили, что осцилляции параметра порядка приводят к эффективному нагреву квазичастиц, а наличие перекрестных членов в кинетическом уравнении ведет к эффективному охлаждению квазичастиц вдали от области, где происходят осцилляции параметра порядка (см. [2,3] в списке подготовленных к публикации статей). На рисунках 21-22 мы представили усредненное по времени распределение параметра порядка  $|\Delta|$  и эффективной температуры  $T_{eff}(x) = T + T_c * \Phi_1$  внутри короткого (рисунок 21) и длинного (рисунок 22) сверхпроводящего мостика. Обратим внимание, что наличие перекрестных членов в кинетических уравнениях (см. Ур.(1) в [2,3] ( в списке подготовленных к публикации статей))

приводит к смене знака эффекта – их наличие приводит к эффективному охлаждению, вместо эффективного нагрева.

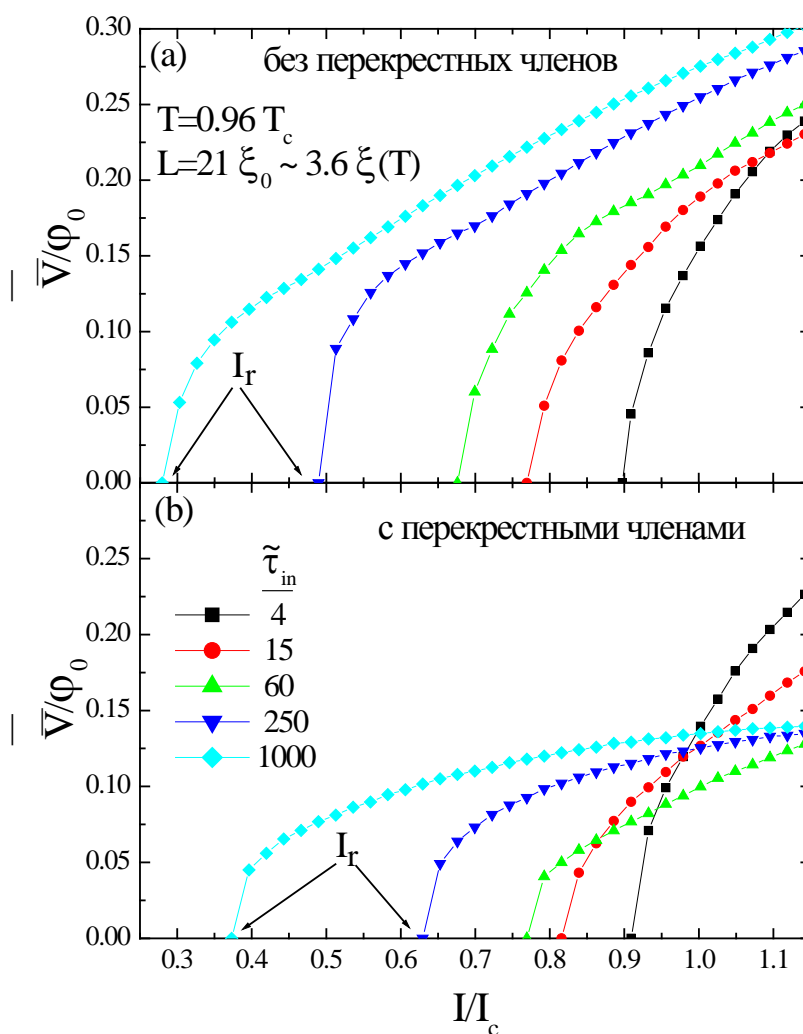


Рисунок 20. Вольт-амперные характеристики длинной сверхпроводящей проволоки (мостика) рассчитанные на основе численного решения нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау в нелокальном пределе. Результаты получены при наличии и отсутствии перекрестных членов в кинетических уравнениях.

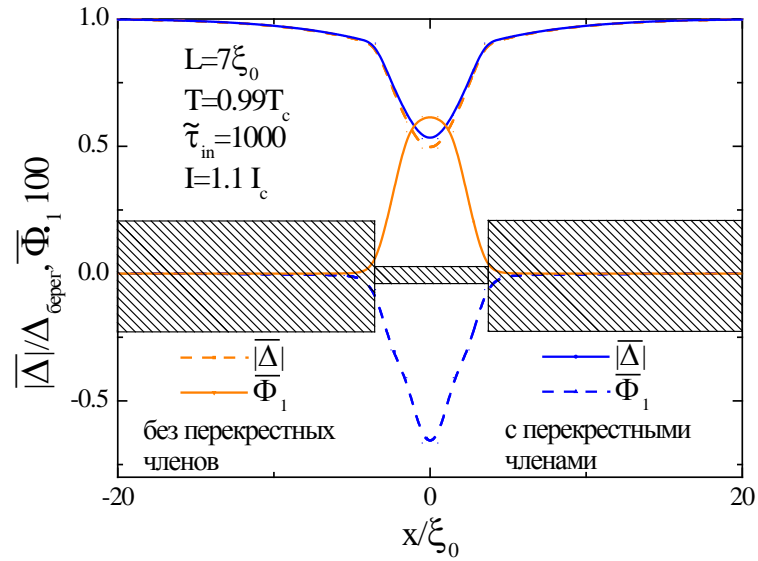


Рисунок 21. Распределение усредненного по времени потенциала  $\Phi_1$  (описывающего эффекты нагрева/охлаждения вследствие неравновесных эффектов  $T_{\text{eff}}(x)=T+T_c*\Phi_1(x)$ ) и параметра порядка  $|\Delta|$  в коротком сверхпроводящем мостике, рассчитанные при наличии и отсутствии перекрестных членов в кинетических уравнениях.

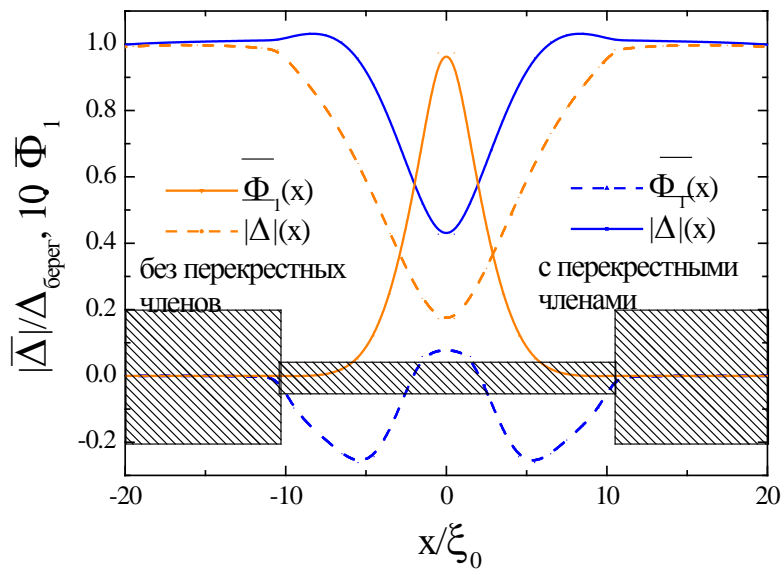


Рисунок 22. Распределение усредненного по времени потенциала  $\Phi_1$  (описывающего эффекты нагрева/охлаждения вследствие неравновесных эффектов  $T_{\text{eff}}(x)=T+T_c*\Phi_1(x)$ ) и параметра порядка  $|\Delta|$  в длинном сверхпроводящем мостике, рассчитанные при наличии и отсутствии перекрестных членов в кинетических уравнениях.

Мы также моделировали влияние магнитного поля на вольтамперные характеристики и ток возврата  $I_r$  в сверхпроводящее состояние, при котором динамический процесс проскальзывания фазы прекращается в сверхпроводящей нанопроводе. Влияние магнитного поля учитывалось в квазиодномерной модели посредством подавления параметра порядка в берегах. Основанием для такого подхода является относительно сильное подавление сверхпроводящего параметра порядка в сверхпроводящих берегах экранирующими токами, созданными внешним магнитным полем. Используя эту модель мы обнаружили, что подавление параметра порядка в берегах приводит к уменьшению  $I_r$  в относительно коротких мостиках (длиной  $L < 3\xi(T)$ ), а в мостиках с длиной  $3\xi(T) < L < L_{in}$  наоборот, к увеличению  $I_r$  и уменьшению сопротивления. Данный эффект может быть объяснен следующим образом. При подавлении параметра порядка в сверхпроводящих берегах диффузия “горячих” квазичастиц из центра проскальзывания фазы становится более эффективной (они могут диффундировать в большем интервале энергий). В результате эффективный нагрев становится слабее и сверхпроводимость восстанавливается при больших токах. В коротких проволоках уменьшение  $I_r$  приводит к увеличению  $\tau_{|\Delta|}$ , так как оно зависит от величины параметра порядка в берегах, и увеличивается с уменьшением  $|\Delta|$ . Данный эффект не “работает” в относительно длинных проволоках (мостиках), так как кор центра проскальзывания фазы находится далеко от сверхпроводящих берегов.

По результатам исследований подготовлено две статьи, одна из которых была послана в журнал *Physical Review B* в феврале 2011 года (см. [2] в списке подготовленных к публикации статей) и вторая подготовлена к публикации (см. [3] в списке подготовленных к публикации статей). Часть результатов была представлена на конференции “Нанофизика и наноэлектроника 2011” (см. [16]). По результатам исследований о влиянии магнитного поля на ВАХ сверхпроводящих проволок готовится еще одна статья.

## 5. Расчет флуктуационной добавки к проводимости (парапроводимости) в квазиодномерных сверхпроводниках и тонких пленках сверхпроводника в неоднородном магнитном поле

В ходе выполнения проекта были исследованы особенности сверхпроводящего фазового перехода в гибридных системах сверхпроводящая пленка - ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности. В частности, было изучено влияние неоднородного магнитного поля, направленного по нормали к пленке, на флуктуационную проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии вблизи температуры перехода. Вклад сверхпроводящих флуктуаций в проводимость учитывался в виде поправки Асламазова-Ларкина  $\Delta g$  к друдевскому кондактансу  $g_D$ .

В отсутствие магнитного поля поправка к кондактансу вблизи температуры сверхпроводящего перехода пропорциональна  $(T - T_c)^{-2+d/2}$ , где  $T$  - температура,  $T_c$  - температура сверхпроводящего перехода,  $d$  - размерность образца сверхпроводника. В рамках настоящего проекта было показано, что пространственно неоднородное магнитное поле  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ , создаваемое доменным распределением намагниченности в ферромагнитной подсистеме, может изменить характер расходимости поправки Асламазова-Ларкина вблизи температуры сверхпроводящего перехода. В частности, поправка к проводимости, соответствующая электронному транспорту вдоль доменной стенки, вблизи критической температуры пропорциональна  $(T - T_{cH})^{-3/2}$ , где  $T_{cH}$  - критическая температура в присутствии поля. Данная температурная зависимость эффективно соответствует квазиодномерному проводящему каналу, формируемому неравновесными куперовскими парами вблизи доменной границы.

В качестве неоднородного магнитного поля было рассмотрено модельное поле в форме ступеньки, зависящее от одной продольной координаты:

$$H_z(x) = H_0 \text{step}(x). \quad (5.1)$$

Такое поле является простейшей моделью поля одиночной доменной стенки толстого слоя ферромагнетика, расстояние между которым и сверхпроводящей пленкой много меньше ширины домена. Схематическое изображение рассматриваемой системы представлено на рисунке 23.

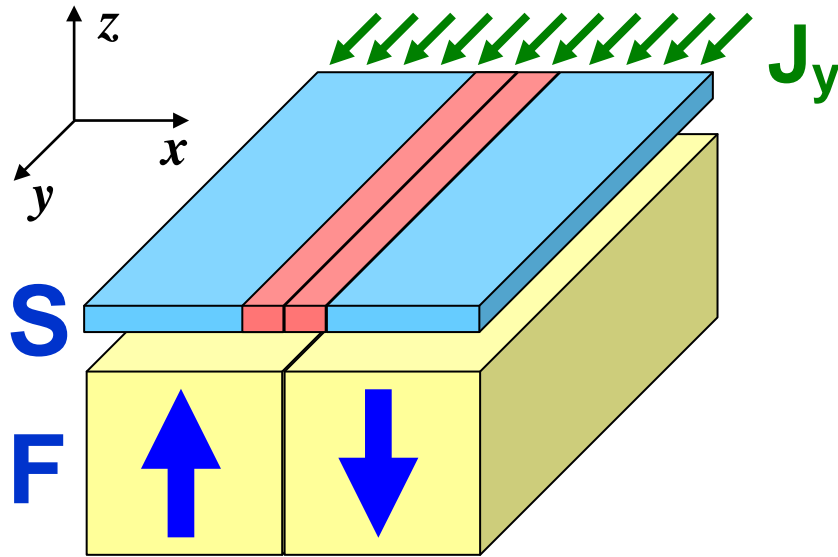


Рисунок 23. Схематическое изображение гибридной системы сверхпроводящая пленка (S) – ферромагнетик с доменной стенкой (F). Красным цветом показана область шириной порядка длины когерентности, вносящая доминирующий вклад в проводимость пленки вблизи температуры сверхпроводящего перехода. Зелеными стрелками показано направление тока.

Аналитический расчет поправки Асламазова-Ларкина проводился на основе нестационарного уравнения Гинзбурга-Ландау. При этом диагональная компонента тензора проводимости, соответствующая электронному транспорту вдоль доменной стенки, определялась спектром оператора (здесь и далее используется система единиц, в которой  $\hbar = c = 1$ )

$$\hat{H} = -\alpha T_c \left[ \varepsilon + \xi^2 (\nabla - 2ie\mathbf{A})^2 \right], \quad (5.2)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теории Гинзбурга-Ландау,  $\varepsilon = (T - T_c)/T_c$ ,  $T$  - рассматриваемая температура,  $T_c$  - температура сверхпроводящего перехода в отсутствие магнитного поля,  $\xi$  - длина когерентности при нулевой температуре,  $e$  - заряд электрона,  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  - векторный потенциал магнитного поля, который был выбран направленным вдоль оси  $y$ :  $A_y = H_0 |x|$ .

Спектр  $E_{n,k}$  гамильтониана (5.2) определяется двумя квантовыми числами: номером зоны  $n$  и волновым вектором вдоль границы доменной стенки  $k$ . Вид спектра  $E_{n,k}$  при  $\varepsilon = 0$  и  $H_0 = H_{c2}$  ( $H_{c2} = 1/2e\xi^2$  - второе критическое поле сверхпроводящей пленки) показан на рисунке 24.



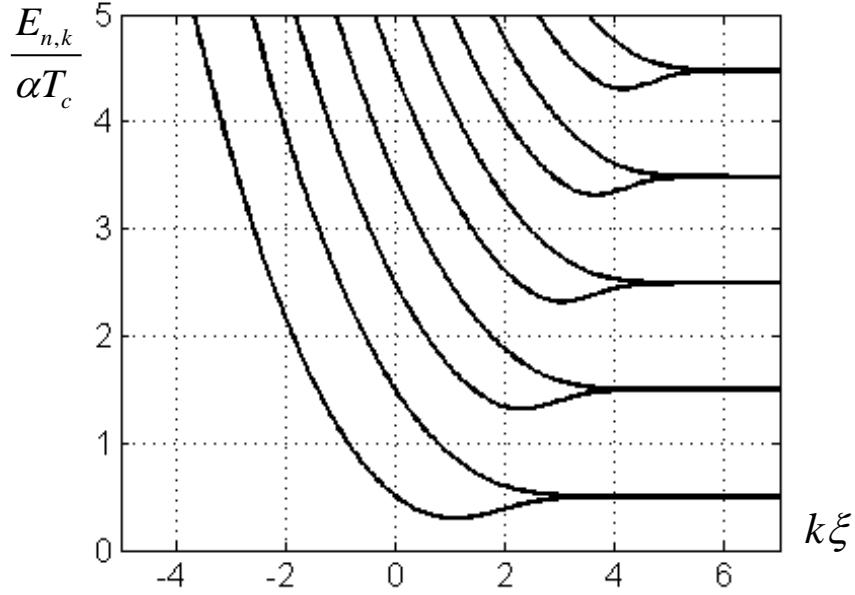


Рисунок 24. Форма спектра гамильтониана (АЛ\_2) при  $\varepsilon = 0$  и  $H_0 = H_{c2}$ .

В случае, когда температура пленки близка к температуре сверхпроводящего перехода, было показано, что поправка Асламазова-Ларкина определяется областью  $k$  вблизи минимума нижней ветки спектра. В данной области спектр может быть разложен в степенной ряд:

$$E_{0,k} = \alpha T_c \left[ \varepsilon + E_0(H_0) + \xi^2 \rho(H_0) (k - k_0)^2 \right], \quad (5.3)$$

где  $E_0(H_0)$  - минимальное значение энергии, зависящее от величины магнитного поля, а безразмерная функция  $\rho(H_0)$  характеризует скорость изменения энергии вблизи минимума. Тогда поправка к кондактансу имеет вид:

$$\Delta g^{yy} = \frac{\pi e^2 \xi \sqrt{\rho(H_0)}}{16L \left[ (T - T_{cH_0}) / T_c \right]^{3/2}}. \quad (5.4)$$

Здесь  $T_{cH_0} = T_c [1 - E_0(H_0)]$  - критическая температура в присутствии поля,  $L$  - длина образца в направлении, перпендикулярном доменной стенке. Выражение (5.4) справедливо в температурном интервале

$$\left( \frac{g_0}{g_D} \right)^{2/3} \ll \frac{T - T_{cH_0}}{T_c} \ll 0,56 \left( \frac{H_0}{H_{c2}} \right), \quad (5.5)$$

где  $g_0 = e^2$  - квант кондактанса.

Таким образом, в ходе выполнения проекта было получено и проанализировано аналитическое выражение для флуктуационной поправки к проводимости вблизи температуры сверхпроводящего перехода. Показано, что при стремлении температуры к критической доминирующий вклад в проводимость сверхпроводящей пленки вносят квазиодномерные области

(с шириной порядка длины когерентности), формируемые вблизи доменных границ ферромагнитной подсистемы. При этом температурная зависимость кондактанса эффективно имеет одномерный характер:

$$\Delta g^{yy} \propto (T - T_{cH_0})^{-3/2}. \quad (5.6)$$

Результаты работы были представлены на конференции “Нанопизика и нанозлектроника 2010” (см. [18] в списке литературы). По материалам работы также готовится статья.

## 6. Изготовление и аттестация волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа.

Впервые в России был разработан, изготовлен и аттестован проекционный объектив Щварцшильдского типа, образованный двумя асферическими зеркалами, для стенда проекционного нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным пространственным разрешением 30 нм. Числовая апертура объектива составила  $NA=0,3$ . Волновая aberrация объектива, до нанесения отражающего интерференционного зеркала Mo/Si, составила 0,9 нм. После нанесения многослойной структуры из-за неполной компенсации механических напряжений в пленках (недокомпенсация составила примерно 10%) aberrация объектива возросла до 1,71 нм. Тем не менее, на данном этапе исследований этого вполне достаточно для получения наноструктур методом проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Работа включала в себя решение таких проблем, как разработка методов аттестации aberrаций объектива и коррекции формы подложек для зеркал с субнанометровой точностью, прецизионных методов восстановления aberrаций по данным интерферометрического контроля и комплекс других работ, связанных с напылением многослойных структур. По результатам этих исследований опубликован ряд работ в реферируемых журналах [19-25].

В настоящее время в ИФМ РАН ведутся работы по созданию стенда нанолитографа с рабочей длиной волны  $\lambda=13,5$  нм, который предназначен для формирования рисунка на фоторезисте с минимальным размером элемента до 30 нм [26]. Ключевым элементом нанолитографа, определяющим пространственное разрешение, является проекционный объектив. Для достижения дифракционного предела разрешения изображающей схемы, в соответствии с критерием Релея, корень квадратный из среднеквадратической деформации ее волнового фронта не должен превышать  $\lambda/14$  (критерий Марешаля), где  $\lambda$  – рабочая длина волны. В нашем случае, для проекционного объектива с рабочей длиной волны 13,5 нм деформация волнового фронта не должна превышать  $rms_{об}=0,96$  нм (root-mean-square).

Традиционная оптическая промышленность обеспечивает почти на два порядка худшую точность изготовления оптики. На мировом рынке соответствующая продукция так же отсутствует и, фактически, только фирма Цайс, Германия, производит подобную оптику в ограниченных объемах для проектов по литографии экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона [27]. Поэтому, для создания проекционного объектива для отечественного ЭУФ нанолитографа в ИФМ РАН был проведен комплекс исследований и разработан ряд методик и технологий в областях метрологии и изготовления (коррекции) оптических элементов, в том числе и асферической формы, с субнанометровой точностью.

Для аттестация волновых деформаций объектива, а также его отдельных элементов на стадии изготовления применялся интерферометр [28], использующий в качестве эталонного фронта сферическую волну, возникающую в результате дифракции света на выходе одномодового оптического волокна с зауженной до субволновых размеров выходной апертурой [29].

Коррекция формы подложек для зеркал до субнанометровых точностей осуществлялась методами локального ионно-пучкового травления и напыления тонких пленок [30].

Для повышения энергетической эффективности и поля зрения проекционного объектива была выбрана простейшая двухзеркальная схема Шварцшильда с асферическими зеркалами (вогнутое M2 и выпуклое M1). Расчет параметров объектива, включая коэффициенты при высших порядках асферики и допустимые отклонения параметров от номинальных значений, производился с помощью программы ZEMAX. Результаты расчетов представлены в [24].

Форма вогнутого асферического зеркала M2 отличается от ближайшей сферы примерно на 5,7 мкм. Эксперимент показал, что прямое применение интерферометра со сферической эталонной волной оказалось невозможным для аттестации его формы. Во-первых, число интерференционных полос достигало почти 100, что сильно затрудняло определение положения минимумов. Во-вторых, из-за большого диаметра пятна фокусировки в области источника эталонной сферической волны, рисунок 25(а), почти половина интерференционной картины отсутствует. Для решения этой проблемы был разработан и применен корректор (компенсатор) волнового фронта, рисунок 26 (поз. 11), преобразующий сферический фронт в асферический по форме совпадающей с исследуемой асферикой. Как видно из рисунка 25(б), применение компенсатора позволило получить интерферограмму, которую можно надежно обрабатывать.

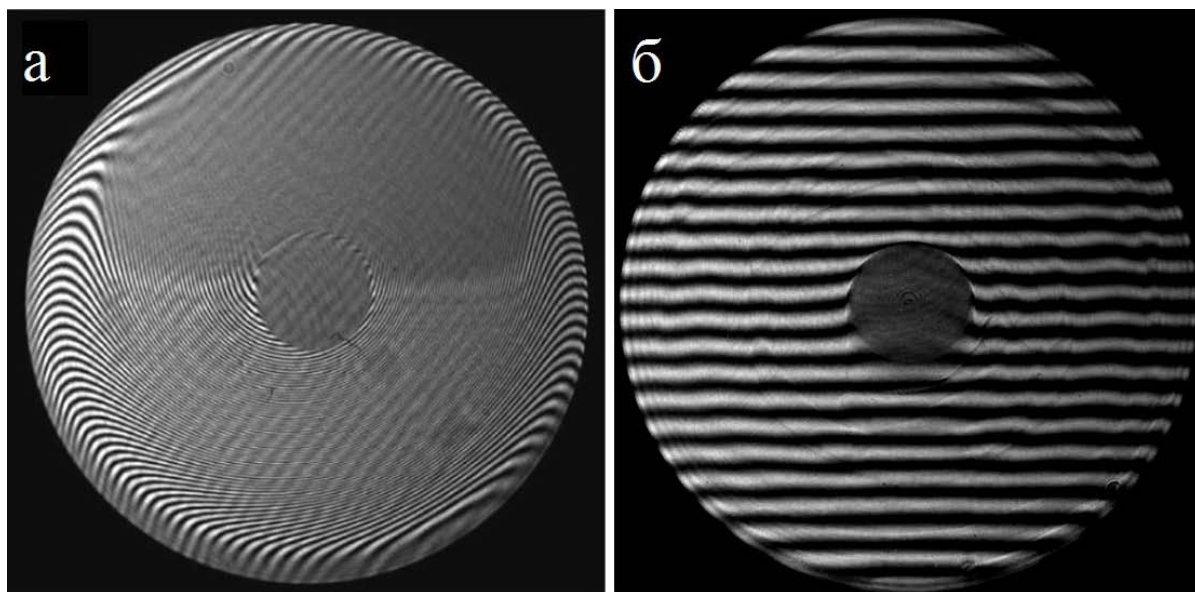


Рисунок 25. Интерферограммы асферического зеркала M2 нанолитографа: а) полученная при стандартном способе регистрации с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения; б) – с использованием компенсатора.

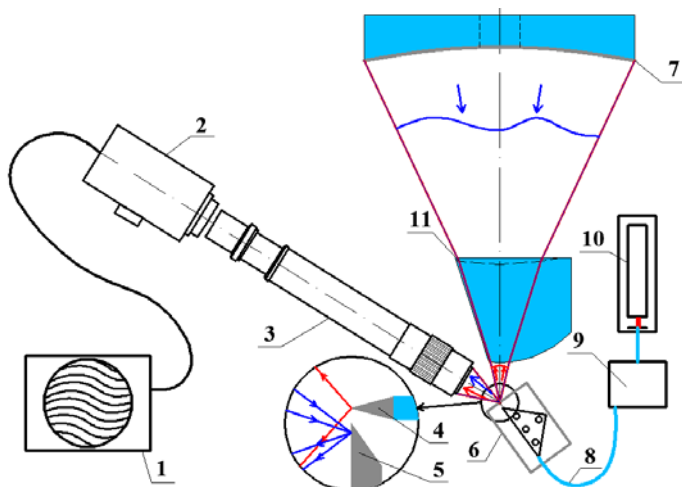


Рисунок 26. Схема аттестации асферического зеркала M2. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 7 – асферическое зеркало M2; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – оптический компенсатор.

Данный оптический элемент, включенный в схему измерений, вносит собственные деформации, в связи с его неидеальностью. Одним из параметров компенсатора, влияющих на деформации фронта, является его толщина. Расчет зависимости деформации фронта, прошедшего через компенсатор и обусловленной отклонением его толщины от номинального значения, показал, что изменение толщины в пределах  $\pm 100$  мкм, приводит к деформации фронта компенсатора менее  $\lambda_n/1000$  ( $\lambda_n=632,8$  нм – рабочая длина волны интерферометра). Необходимо учесть, что традиционные методы изготовления оптики гарантируют точность толщины на уровне  $\pm 20$  мкм. Таким образом, ошибки толщин, возникающие при изготовлении компенсаторов, не являются критическими.

Другим фактором, влияющим на деформацию прошедшего волнового фронта, является неидеальность его поверхностей. Компенсатор имеет две сферические поверхности (они должны быть только сферическими, чтобы их можно было аттестовать с помощью интерферометра со сферической эталонной волной): вогнутую и выпуклую. Измерение вогнутой поверхности производится классическим способом [28]. Аттестация выпуклой поверхности компенсатора производится с помощью 6-ти линзового объектива в два этапа. На первом этапе делается измерение aberrаций объектива при прохождении через него эталонной сферической волны по схеме, показанной на рисунке 27. На втором этапе измеряется непосредственно сама форма выпуклой поверхности, см. рисунок 28, а из полученной карты вычитаются aberrации объектива.

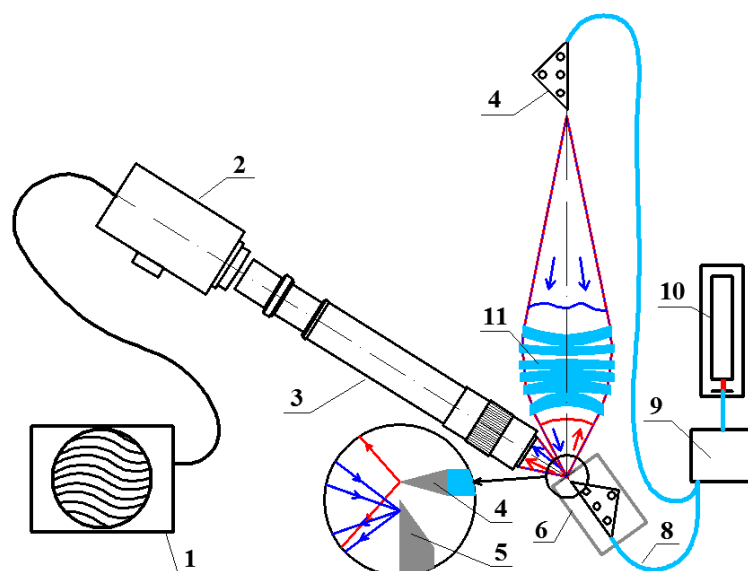


Рисунок 27. Схема аттестации 6-ти линзового объектива. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – оптический компенсатор.

При аттестации асферического зеркала M2 учитываются неидеальности поверхностей компенсатора. Метод изучения формы выпуклого асферического зеркала M1 будет изложен в пункте 9 данного отчета.

Схема и фотография аттестации aberrаций проекционного объектива непосредственно в интерферометре приведены на рисунке 29. Оба источника эталонной сферической волны запитывались излучением одного лазера с длиной волны 530 нм. Два когерентных пучка получались с помощью оптоволоконного делителя. Длина когерентности лазера (вторая гармоника Nd:YAG лазера) составляла несколько метров. Результаты измерений aberrаций объектива, после нанесения отражающих Mo/Si многослойных структур приведены на рисунке 30. Из-за недостаточно полной компенсации механических напряжений в пленках (недокомпенсация напряжений примерно 10%), aberrация объектива выросла в 2 раза.

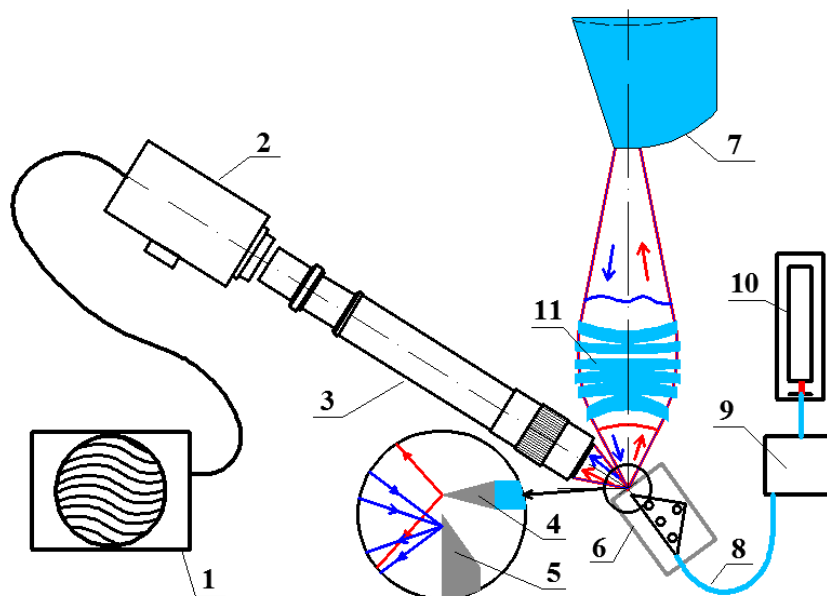


Рисунок 28. Схема аттестации вогнутой поверхности компенсатора с помощью 6-ти линзового объектива. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 7 – оптический компенсатор; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – 6-ти линзовый объектив.

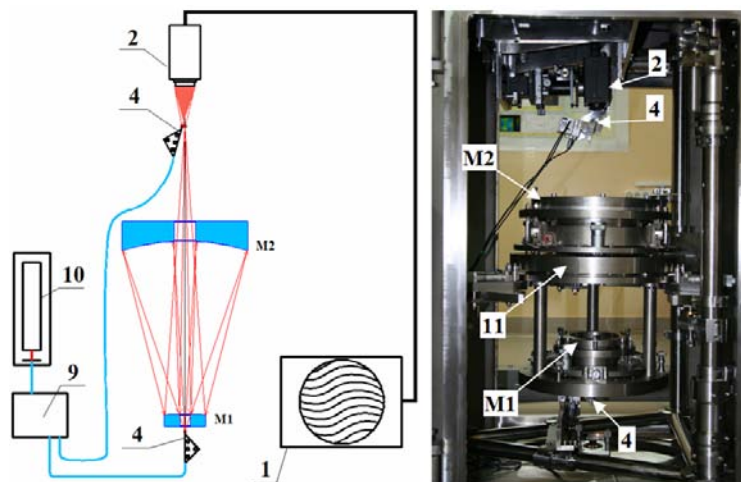
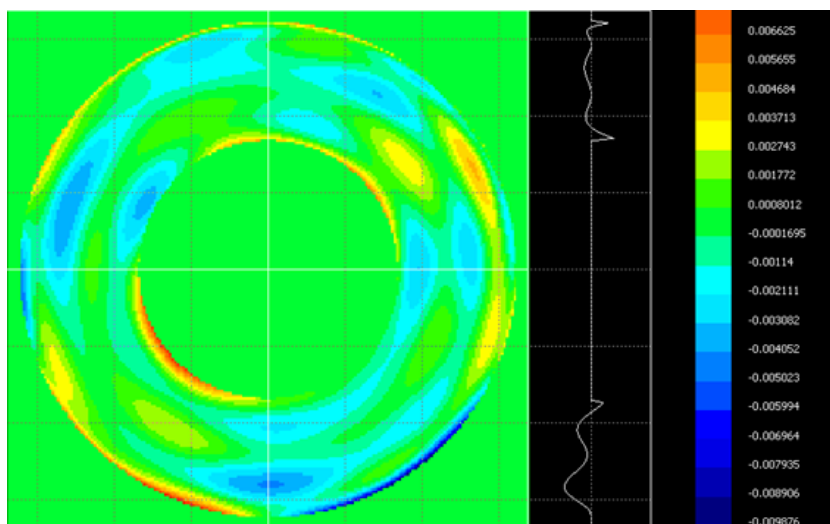


Рисунок 29. Схема аттестации 2-х зеркального объектива в интерферометре. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 4 – источник эталонной сферической волны; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – 2-х зеркальный объектив; M1 и M2 – асферические зеркала.



**PV=19,4 нм RMS=1,71 нм. Исходное состояние.**

Рисунок 30. Карта aberrаций объектива в интерферометре. Числовая апертура  $NA=0,3$ .

Как видно из карты среднеквадратическая aberrация волнового фронта составила 1,71 нм.

Необходимо отметить, что при создании сверхточной оптики встал вопрос о ее креплении в механические оправы. Проблема заключалась в том, что при малейшем механическом воздействии на подложку, даже когда она просто лежит под собственным весом, форма поверхности деформируется с субнанометрового уровня до десятков нанометров. В рамках данной работы эта проблема также была решена. Подробно это описано в [32].



## **7. Изучение влияния антидиффузионных барьерных слоев силицида молибдена в Mo/Si МС на коэффициенты отражения в ЭУФ диапазоне.**

Коэффициенты отражения зеркал в наибольшей степени определяются качеством межслоевых границ или переходной областью, длина которой экспоненциально влияет на амплитудные коэффициенты отражения излучения на границах. При этом зачастую, в величину переходной зоны дают вклад не только геометрическая шероховатость поверхности, связанная с физикой роста тонких пленок, но и перемешивание пленок на границах. Природа этого перемешивания может быть различной, от чисто химического взаимодействия материалов, до физической диффузии и баллистического перемешивания пленок, связанного с наличием атомов и ионов больших энергий (десятки эВ) в поступающем на подложку конденсате. Одним из перспективных методов уменьшения диффузионного и химического перемешивания пленок является применение антидиффузионных барьеров. В частности ранее нам удалось с помощью материала В4С в качестве барьера увеличить коэффициенты отражения Mo/Si зеркал с 67,5% до 69%. Однако, это все еще далеко от теоретического предела 73%.

В рамках данного этапа изучались Mo/Si<sub>2</sub> барьерные слои. Эксперименты показали, что при малых толщинах, примерно до 0,7 нм, антидиффузионный слой не оказывает заметного влияния на коэффициент отражения, в то время как при увеличении его толщины наблюдается падение коэффициента отражения. По-видимому, позитивный эффект компенсируется дополнительным поглощением. То, что при малых толщинах не наблюдается падения коэффициента отражения, это обнадеживающий факт, так как силицид молибдена уже вносит дополнительное поглощение. Следующими материалами, которые будут изучаться, являются силициды ниобия, циркония и иттрия в силу их близкой к силициду молибдена химической стабильности, но меньшего поглощения в окрестности 13,5 нм.

## 8. Изготовление узлов стенда проекционной схемы нанолитографа.

Ключевыми элементами нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм являются источник излучения, светосильное зеркало-коллектор, сложное составное зеркало-гомогенизатор, многослойная отражательная маска-шаблон на которой формируется топология наноструктуры и изображение которой с помощью проекционного объектива с уменьшением переносится на пластину с фоторезистом. Для контроля положения пластины с фоторезистом с точностью 100 нм используется система автофокуса. В рамках данного этапа был разработан и изготовлен ряд принципиальных узлов нанолитографа. Результаты изложены в работах [22, 24, 26, 33-35].

С помощью осветительной части происходит сбор ЭУФ излучения из источника и формирование на маске пятна с П-образным распределением интенсивности, с размером, совпадающим с полем зрения проекционного объектива, и с набором углов, захватываемых объективом. Изображение рисунка на маске с уменьшением в 5 раз проецируется на пластину с фоторезистом с помощью двухзеркального объектива Шварцшильда.

Осветительная система маски нанолитографа состоит из источника ЭУФ излучения (в нашем случае, разборная рентгеновская трубка с кремниевой мишенью), коллектора, представляющего собой сферическое зеркало с отражающим покрытием Mo/Si и собирающего излучение источника из телесного угла 1 стерадиан, и составного зеркала (гомогенизатора), обеспечивающего равномерное распределение интенсивности излучения на маске в области  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  и сохранение соответствия угла освещения входной числовой апертуре проекционного объектива. На рисунке 31(а) представлена оптическая схема осветителя с основными размерами.

На рисунке 31(б) показана структура пучка лучей, падающего на составное зеркало в увеличенном масштабе. Для того, чтобы отраженные пучки не выходили бы за пределы телесного угла, ограниченного поверхностью данного зеркала, с центром схождения лучей на расстоянии 150 мм, где должна располагаться маска (см. рисунок 31(а)), необходимо, чтобы профиль отражающей поверхности был либо асферическим, либо изломанным в соответствии с нелинейностью распределения лучей в пучке.

Гомогенизатор, схема которого показана на рисунке 32, состоит из 25 частей – минизеркал, представляющих собой выпуклые сферические поверхности.

Для определения оптимальных значений радиусов, сборки и точной настройки каждого минизеркала индивидуально был произведен численный расчет оптической схемы с помощью программы ZEMAX. Изначально в качестве источника выступал точечный источник, сферический фронт от которого отражался от коллектора и падал на гомогенизатор. Если каждый элемент гомогенизатора расположить таким образом, чтобы центральные нормали были параллельны друг другу, то изображения от элементов не соберутся на маске в заданной области, а будут разбросаны по площади размером  $80 \times 80 \text{ мм}^2$ , что показано на рисунке 33(а). Для того чтобы собрать

отраженный свет, минизеркала гомогенизатора должны быть наклонены по отношению к центральному на определенный угол. Результаты численного расчета показаны на рисунке 33(б).

В таблице 1 приведены углы падения света  $\Theta_{\text{пад}}$  на минизеркала по отношению к нормали. Из рисунка видно, что свет собирается в области  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  (черный квадрат), но изображение не равномерно засвечивает данную область. Если мы зададим реальные размеры источника,  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ , с распределением интенсивности относительно оси системы совпадающим с угловой зависимостью выхода флуоресцентного излучения SiLa при возбуждении электронным пучком [18], то мы получим изображение на маске, показанное на рис. 8.3(в). Также распределение интенсивности засветки полностью удовлетворяет требованиям. После того как были найдены углы падения на минизеркала, для каждого из них были рассчитаны значения периодов Mo/Si многослойных отражающих покрытий  $d_{\text{опт}}$  (см. таблицу 1), находящиеся в резонансе с длиной волны 13,5 нм. После этого подложки разделялись по группам с близкими значениями периодов и каждая группа напылялась отдельно.

Таблица 1. Углы падения на минизеркала и рассчитанные для них значения периодов Mo/Si многослойных отражающих покрытий  $d_{\text{опт}}$ , находящиеся в резонансе с длиной волны 13,5 нм.

№ зеркала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	21	22	23	24	25	16	17	18	19	20					
$\Theta_{\text{пад}}, ^\circ$	26,9	22,8	18,7	14,5	11,5	25,2	20,3	16,5	12,5	7,7	24,3	19,9	16	12	6,3
$d_{\text{опт}}, \text{нм}$	7,88	7,59	7,35	7,17	7,08	7,76	7,44	7,26	7,11	7	7,7	7,42	7,24	7,1	6,98

Напыление Mo/Si структур производилось методом магнетронного распыления. Подробнее об установке и условиях роста можно найти в [19]. После напыления у каждого минизеркала изучались отражательные характеристики. В случае, если период зеркала не попадал в заданный  $\pm 1,5\%$  интервал, покрытие стравливалось и, после соответствующей коррекции технологического процесса, производилось повторное напыление.

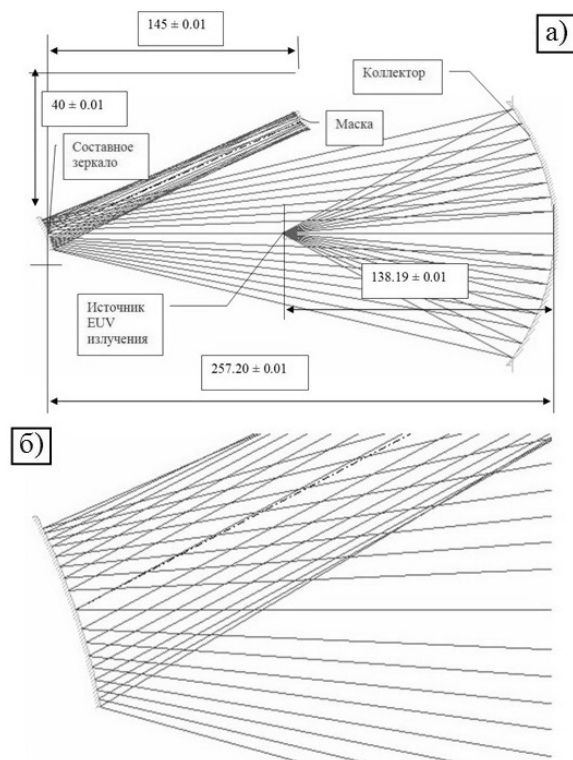


Рисунок 31. а) Оптическая схема осветителя; б) Структура пучка лучей, падающего на составное зеркало (составное зеркало условно показано в виде профиля сферической поверхности).

При аттестации отражательных характеристик выпуклых минизеркал, особенно с маленькими радиусами кривизны, существует проблема с определением абсолютного значения коэффициента отражения. Это связано с тем, что пучок, отраженный от исследуемого зеркала, расширяется и часть его не попадает в щель детектора. Поэтому измеренные значения коэффициента отражения, рисунок 34, нижняя кривая, оказываются заниженными. Для уверенности, что коэффициент отражения удовлетворяет требованиям, одновременно со сферическими зеркалами напыляется плоское зеркало-свидетель, располагаемое на той же высоте, что и напыляемый образец. Верхняя кривая соответствует отражению от свидетеля. Как видно, коэффициент отражения в окрестности длины волны 13,5 нм составляет  $R=67,5\%$ , что соответствует мировому уровню.

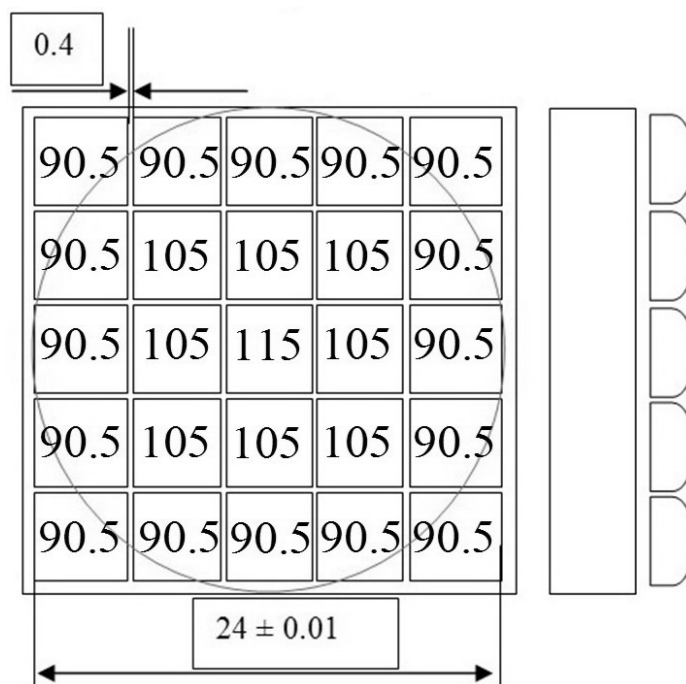


Рисунок 32. Составное зеркала с 25-ю минизеркалами. Окружность показывает область сосредоточения  $\sim 100\%$  световой энергии, идущей от коллектора.

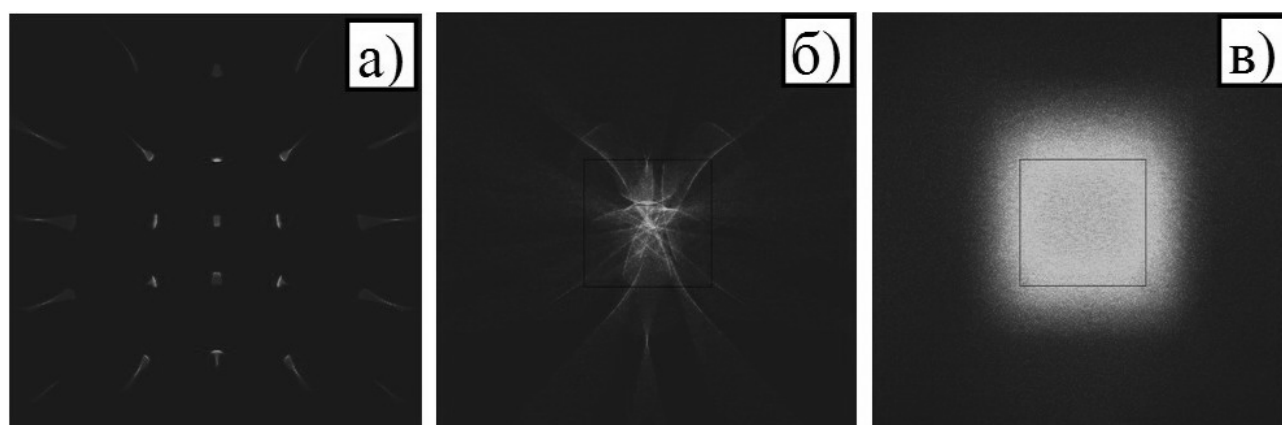


Рисунок 33. Изображение на маске: а) – центральные нормали минизеркал параллельны; б) и в) – минизеркала нужным образом съюстированы (размер источника для случая в) –  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ ).

На основе проделанных расчетов был разработан стенд, позволяющий юстировать каждый элемент составного зеркала. Фотография стенда показана на рисунке 35. В данном эксперименте в качестве источника использовалось одномодовое оптическое волокно с зауженной до  $0,25 \text{ мкм}$  выходной апертурой и который, по сравнению с характерными размерами оптической системы, можно считать точечным. Последнее позволяет производить сравнение экспериментальных данных с данными, полученными в ходе расчета с помощью программы ZEMAX. Принципиальная схема эксперимента и расположение минизеркал гомогенизатора показаны на рисунке 36. На рисунке 37 представлены изображения от минизеркал №13, №14, №17 и №18, а также суммарная картина. Результаты, полученные экспериментально, хорошо согласуются с численными

расчетами. После установки и юстировки минизеркал в рабочее положение они фиксировались в этом положении с помощью эпоксидного клея.

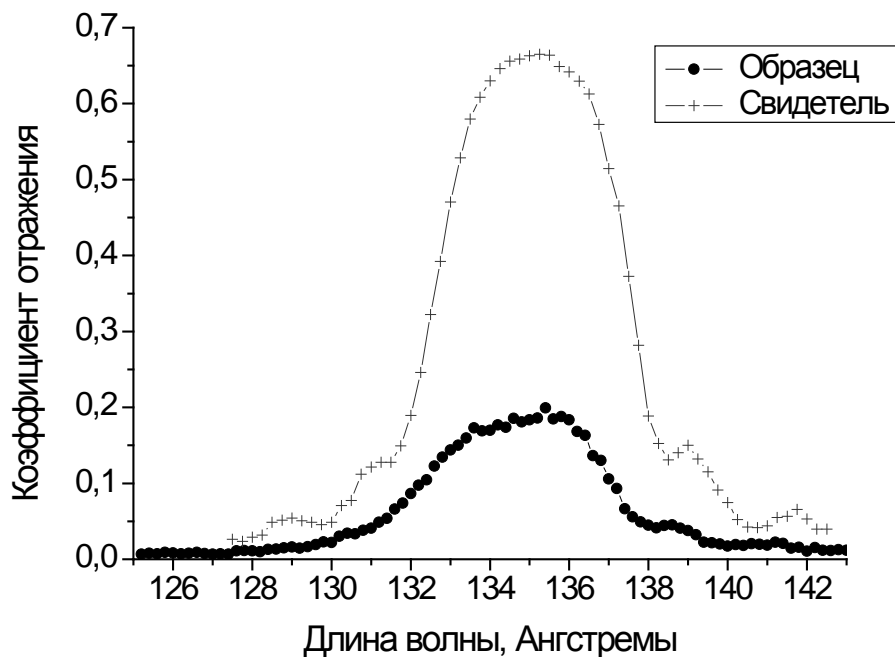


Рисунок 34. Коэффициенты отражения минизеркал (образец) и плоского зеркала-свидетеля в окрестности длины волны  $\lambda=13,5$  нм.

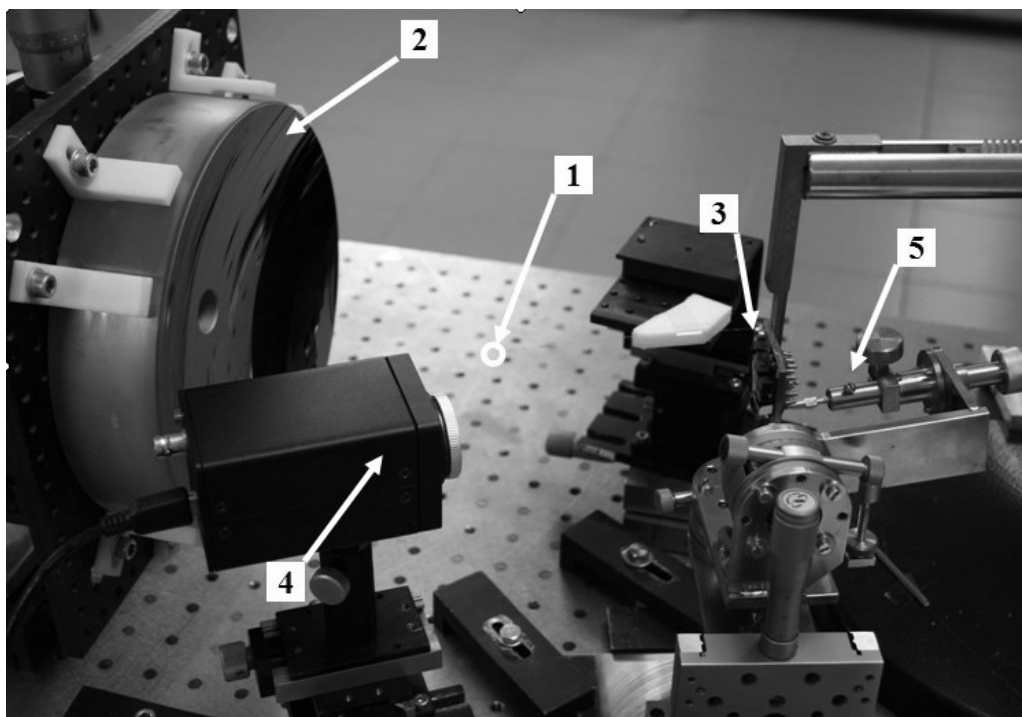


Рисунок 35. Фотография стенда осветительной части нанолитографа на котором производится сборка гомогенизатора. 1 – волоконный источник сферической волны, 2 – коллектор, 3 – гомогенизатор, 4 – камера, 5 – механизм для юстировки минизеркал гомогенизатора.

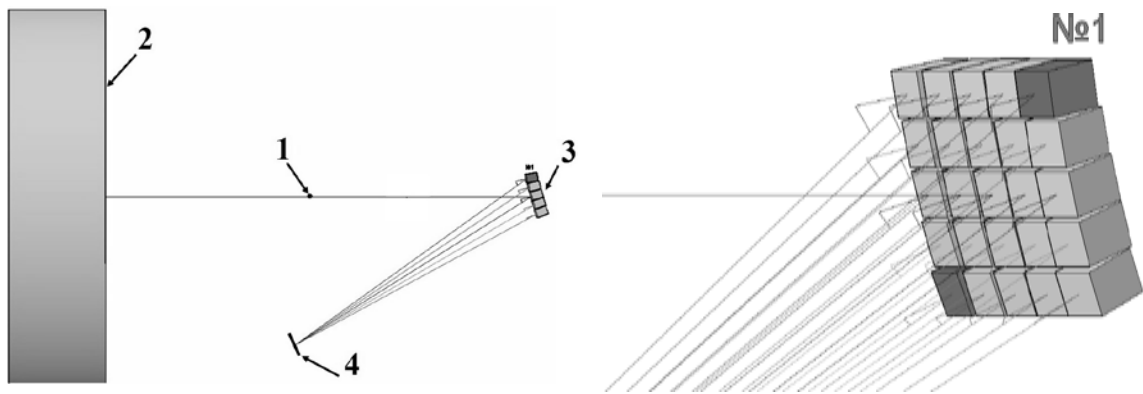


Рисунок 36. Схема осветительной части нанолитографа и расположение минизеркал гомогенизатора. 1 – источник сферической волны, 2 – коллектор, 3 – гомогенизатор, 4 – экран.

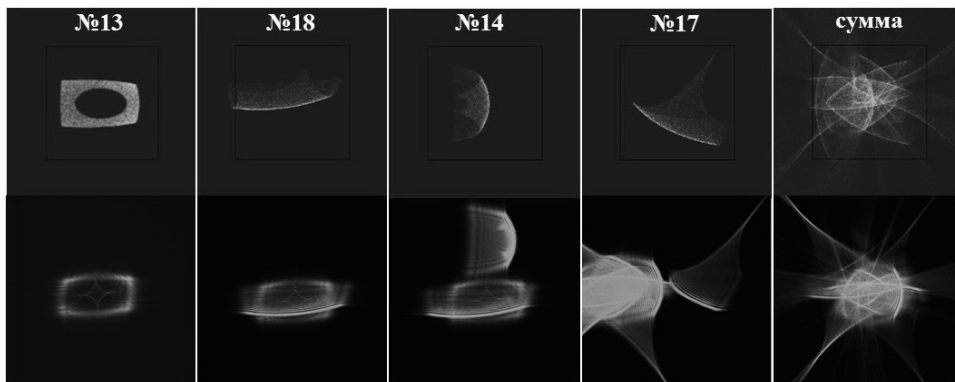


Рисунок 37. Изображения от отдельных минизеркал гомогенизатора и суммарное (сверху – расчет с помощью программы ZEMAX, снизу – экспериментальные результаты).

## 9. Изготовление выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива

Ключевой проблемой дифракционной интерферометрии, использующей в качестве эталонного сферический фронт, возникающий в результате дифракции света на апертуре порядка длины волны, является изучение асферических поверхностей. В большинстве практически важных случаев из-за сильного рассогласования формы фронтов на интерференционной картине наблюдается большое число интерференционных полос, затрудняющее ее расшифровку, а так же резко снижающее точность определения координат экстремумов. Более того, в ряде случаев, из-за большого пятна фокусировки, часть интерферограммы может вообще не попасть в регистрирующую систему, см. рисунок 25. Традиционным методом решения этой проблемы является применение корректоров волнового фронта, преобразующих эталонный сферический фронт в асферический, по форме совпадающий с исследуемой асферикой.

Спецификой данной задачи является необходимость учета aberrаций вносимых корректором с субнанометровой точностью. Это возможно только в случае, если корректор представляет собой одиночную линзу, образованную двумя сферическими поверхностями. В этом случае деформации поверхностей и, соответственно, aberrации волнового фронта после корректора можно измерить с субнанометровой точностью с помощью интерферометра с дифракционной (сферической) эталонной волной. В отличие от вогнутой асферики, требования к компенсатору для изучения выпуклых асферических поверхностей ужесточаются. Наряду с необходимостью трансформации сферического фронта в асферический, необходимо еще и расходящийся фронт преобразовать в сходящийся. Как показала практика, одной линзой этого сделать не удастся.

В рамках данной работы было предложено в качестве компенсатора использовать асферическое вогнутое зеркало, аттестованное с субнанометровой точностью по методикам, описанным в пункте 6. При этом схема аттестации выпуклого зеркала проводилась в составе объектива Шварцшильда по схеме, показанной на рисунке 29. Фотография и измеренная карта деформаций поверхности выпуклого асферического зеркала М1 приведены на рисунке 38. Корень квадратный из среднеквадратического отклонения формы поверхности от расчетной составил  $RMS=0,9$  нм.



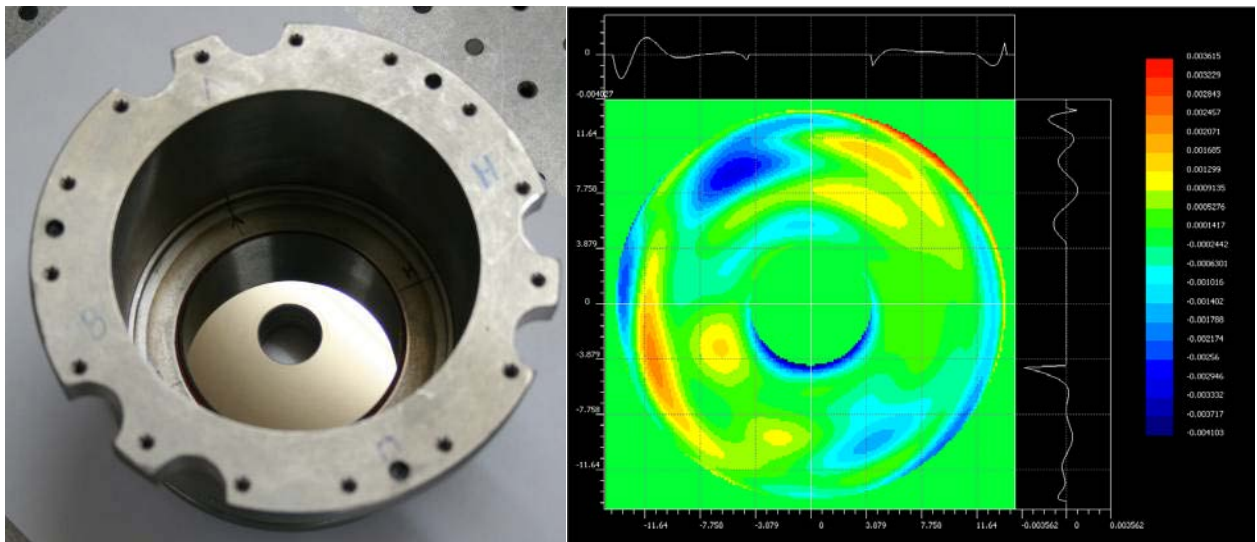


Рисунок 38. Фотография асферического зеркала М1 и карты волновых деформаций объектива до и после 27 коррекций зеркала М1.

После коррекции формы зеркала на его поверхность методом магнетронного распыления наносились антистрессовая (Cr/Sc) и отражающая (Mo/Si) многослойные структуры. Для соблюдения брэгговского условия характеристики отражающего интерференционного покрытия изучались в 28-ти различных точках исследуемого образца в координатах, указанных в таблице 3 по двум перпендикулярным диаметрам. Как и ожидалось, вращение образца в процессе напыления многослойной структуры обеспечило аксиальную симметрию распределения периода по поверхности, поэтому в таблице приводятся данные только по одному радиусу. Как видно из таблицы максимальное отклонение периода многослойной структуры от номинального значения составило 0,6%, что в 3 раза меньше полосы пропускания всей оптической схемы (2%). Типичная спектральная зависимость коэффициента отражения зеркала приведена на рисунке 39.

Таблица 2. Распределение углов падения излучения на первое, рассеивающее, зеркало объектива.

Высота луча на поверхности (мм)	Расчетный угол Брэгга, °	Расчетный период, нм	Измеренный угол Брэгга, °	Измеренный период, нм	Отклонение периода от номинала, %
10	2,72	6,76	5,39	6,78	0,3
15	4,09	6,77	5,39	6,78	0,1
20	5,46	6,78	6,22	6,79	0,1
25	6,86	6,80	6,22	6,79	-0,1

30	8,28	6,82	6,22	6,79	-0,4
32.5	8,99	6,83	6,95	6,80	-0,4
35	9,72	6,85	7,61	6,81	-0,6

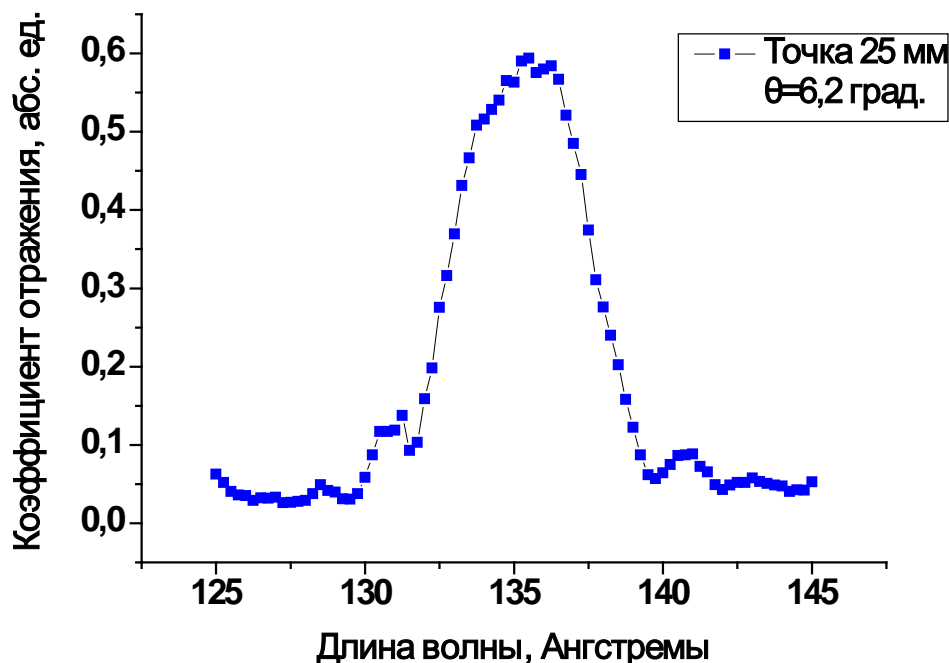


Рисунок 39. Спектральная зависимость коэффициента отражения зеркала в точке с полярной координатой 25 мм М1 с Mo/Si отражающей многослойной структурой. Угол падения излучения на образец 6,2°.

В рамках данного этапа также решалась задача изучения возможностей дифракционных корректоров волнового фронта для решения аналогичных задач. Основными преимуществами такого типа корректора являются меньшая толщина, что уменьшает ошибки волновых фронтов, вызванных неоднородностью материала корректора, и большие возможности с точки зрения создания дополнительных набегов фаз.

В рамках данного анализа использовался подход для расчета корректоров, изложенный в [38]. Основным результатом стала демонстрация того, что традиционный метод расчета дифракционных корректоров волнового фронта, не учитывающий преломление на границах, не обеспечивает требуемой субнанометровой и даже нанометровой точности и, соответственно, требуется развитие новых алгоритмов.

Результаты работ изложены в публикациях [22, 24, 25, 39].

## 10. Разработка конструкции стенда проекционной литографии на длину волны 13.5 нм.

Более чем на порядок меньшая, по сравнению с традиционной ультрафиолетовой литографией, рабочая длина волны нанолитографа во столько же раз увеличила требования к точности изготовления элементов, а так же поддержанию расстояний между элементами оптической схемы. В частности для разрабатываемого в рамках проекта нанолитографа расстояние между зеркалами объектива должно поддерживаться с точностью  $\pm 30$  нм. В относительных единицах это составляет  $10^{-7}$ . Поэтому, конструкция стенда, выбираемые материалы должны были учитывать эти особенности. В результате была выбрана концепция построения стенда, заключающаяся в том, что все основные конструктивные элементы оптической схемы изготавливались из инвара, который обладает наименьшим температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) из всех металлов, а на ключевые элементы (в том числе и на тыльные стороны зеркал объектива) устанавливались датчики положения, ответные элементы которых крепились на ситалловые колонны с ТКЛР на уровне  $10^{-8}$ . Таким образом, задавались «мировые» координаты. Основными результатами данной работы стали. Во-первых, разработана конструкция стенда нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным разрешением 30 нм. Во-вторых, работоспособность принятой концепции построения стенда подтверждена интерферометрическим методом. Показана однозначная корреляция между абберациями объектива и показаниями датчиков положения зеркал. Результаты работы отражены в публикациях [35, 40].

## Заключение

Все задачи первого этапа проекта выполнены полностью:

- Разработана технология создания контактов к многослойным нанодискам, для измерения диодного эффекта при протекании тока перпендикулярно плоскости дисков. Рассчитана структура смешанного состояния сверхпроводника в периодическом магнитном поле и изучение движения вихревых структур при протекании по сверхпроводнику транспортного тока.
- Рассчитана величина критического тока перехода в резистивное состояние для планарной системы сверхпроводник - ферромагнетик с одномерной доменной структурой и системы сверхпроводник – решётка магнитных наночастиц, в зависимости от направления тока по отношению к магнитным доменам в присутствии внешнего магнитного поля.
- Найдены условия существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих металлических проволоках в зависимости от времени релаксации неравновесной функции распределения квазичастиц, длины проволоки и приложенного магнитного поля при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода.
- Рассчитана флуктуационная добавка к проводимости (парапроводимости) в квазиодномерных сверхпроводниках и тонких пленках сверхпроводника в неоднородном магнитном поле.
- Изготовлен проекционный объектив нанолитографа и проаттестованы его волновые деформации.
- Изучено влияние антидиффузионных барьерных слоев силицида молибдена в Mo/Si МС на коэффициенты отражения в ЭУФ диапазоне.
- Изготовлены узлы стенда проекционной схемы нанолитографа.
- Изготовлено выпуклое асферическое зеркало для проекционного объектива.
- Разработана конструкция стенда проекционной литографии на длину волны 13.5 нм.

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по 3 этапу, а также акты испытаний. По результатам работы опубликовано 10 статей в рецензируемых российских и международных журналах. Большая часть полученных результатов докладывалась на международной конференции “Нанофизика и нанoeлектроника 2011” (г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 года) и семинарах ИФМ РАН (было опубликовано 6 тезисов в конференционных сборниках и проведено 7 семинаров).

## Список использованных источников

- [1] **Zhu, J.G.** Magnetoresistive Random Access Memory: The Path to Competitiveness and Scalability/ Jian-Gang Zhu // Proceedings of IEEE – 2008. - Vol.96. - P.1786.
- [2] **Hirota, E.** Giant Magneto-Resistance Devices / E.Hirota, H.Sakakima, K.Inomata // Springer Series in surface science –2001. – Vol. 40. – P. 103.
- [3] **Fraerman, A. A.** Diode effect in a medium with helical magnetic structure / A. A. Fraerman, O.G. Udalov // Phys. Rev. B – 2009. – Vol. 77. – P. 94401.
- [4] **Rottlader, P.** Tantalum oxide as an alternative low height tunnel barrier in magnetic junctions/ P. Rottlader, M. Hehn, O. Lenoble, and A. Schuhl // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 78. – P. 3274.
- [5] **Worledge, D. C.** Spin flop switching for magnetic random access memory./ D. C. Worledge // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84. - P. 4559.
- [6] **Вдовичев, С.Н.** Магнитные туннельные контакты / С.Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, С. А. Гусев, И.Р. Каретникова, А.Ю. Климов, И.М. Нефедов, В.В. Рогов, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский // Труды XV международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 175.
- [7] **Нефедов, И.М.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612682 "Моделирование процессов в сверхпроводящих мезоскопических пленках во внешних полях (GLDD)" / И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский, А.Ю. Аладышкин, В.В. Курин, Д.А. Рыжов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. – 2011.
- [8] **Путилов, А.В.** Локализованная сверхпроводимость и критические токи в мезоскопических планарных структурах сверхпроводник-ферромагнетик / А.В. Путилов, С.В. Миронов, Д.А. Савинов, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский, А.Ю. Аладышкин // Труды XV международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 296-297.
- [9] **Аладышкин, А.Ю.** Захват вихрей и осцилляции критического тока в мезоскопических сверхпроводящих криотронах / А.Ю. Аладышкин, Г.В. Атаклти, В. Гиллийнс, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский, А. Силанек, Й. Ван де Вондел, М. Кеммлер, Р. Клейнер, Д. Кёлле, В.В. Моцалков // Труды XV международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 232-233.
- [10] **Aladyshkin, A.Yu.** Mesoscopic cross-film cryotrons: Vortex trapping and dc-Josephson-like oscillations of the critical current / A.Yu. Aladyshkin, G.W. Ataklti, W. Gillijns, I.M. Nefedov, I.A. Shereshevsky, A.V. Silhanek, J. Van de Vondel, M. Kemmler, R. Kleiner, D. Koelle, and V.V. Moshchalkov // Physical Review B. – 2011. – Vol. **83**. – N. 144509.

- [11] **Aladyshkin, A.Yu.** Planar superconductor/ferromagnet hybrids: Anisotropy of resistivity induced by magnetic templates / A.Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, and V.V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – N. 222503.
- [12] **Aladyshkin, A.Yu.** Giant anisotropy of the resistance induced by magnetic domains in superconductor/ferromagnet hybrids / A.Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, and V.V. Moshchalkov // *Physica C: Superconductivity.* – 2010. – Vol. 470. – P. 883-885.
- [13] **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.
- [14] **Buck, D.A.** The Cryotron – Superconductive Computer Component / D.A.Buck // *Proc. IRE.* – 1956. – Vol. 44. – P. 482.
- [15] **Kapra, A. V.** The guidance of vortex–antivortex pairs by in-plane magnetic dipoles in a superconducting finite-size film / A. V. Kapra, V. R. Misko, D. Y. Vodolazov and F. M. Peeters // *Supercond. Sci Technol.* – 2011. – Vol. 24 -N. 024014.
- [16] **Vodolazov, D. Y.** Strong influence of nonlocal nonequilibrium effects on the dynamics of the order parameter in a phase-slip center: Ring studies / D. Y. Vodolazov, F. M. Peeters // *Phys. Rev. B* – 2010. – Vol. **81** –N. 184521.
- [17] **Водолазов, Д.Ю.** ”Нагрев” квазичастиц в коротких сверхпроводящих микромостиках, вызванный осцилляциями параметра порядка / Д.Ю. Водолазов, F. M. Peeters // Труды XV международного симпозиума «Нанопизика и нанопэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 196-197.
- [18] **Мельников, А.С.** Флуктуационная проводимость в гибридных системах сверхпроводник-ферромагнетик / А.С. Мельников, С.В. Миронов, С. В. Миронов // Труды XIV международного симпозиума «Нанопизика и нанопэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2010. – С. 364-365.
- [19] **Chkhalo, N.I.** Manufacturing of diffraction quality optical elements for high resolution optical systems / N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. // *Proc. of SPIE.* –2010.- Vol. 7521.- P. 752104.
- [20] **Салашченко, Н.Н.** Физические ограничения точности измерений интерферометров с дифракционной волной сравнения/ Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // *Известия РАН. Серия физическая.* –2010. - Том 74.- С. 62.
- [21] **Салашченко, Н.Н.** Особенности установки сверхточной оптики в оправы / Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2010. - Vol. 5. - С. 3.

- [22] N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N., Salashchenko and M.N. Toropov (2010). **Manufacturing and Investigating Objective Lens for Ultrahigh Resolution Lithography Facilities**, Lithography, Michael Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-064-3, INTECH.
- [23] **Барышева, М.** Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии / М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салащенко, И.Л. Струля, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. -С. 71-76.
- [24] **Zuev, S. Yu.** Two\_Mirror Projection Objective of a Nanolithographer at  $\lambda = 13.5$  nm/ S. Yu. Zuev, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, A. S. Skryl, I. L. Stroulea, L. A. Suslov, M. N. Toropov, and N. I. Chkhalo // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2011. - Vol. 75. – P. 57.
- [25] **Зуев, С.Ю.** Технологический комплекс для изготовления прецизионной изображающей оптики / С.Ю. Зуев, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. - С. 57.
- [26] **Волгунов, Д.Г.** Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов / Труды 14-го международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта 2010, Т. 1. С. 193.
- [27] Website Carl Zeiss. <http://www.zeiss.de>
- [28] **Ключенков, Е.Б.** Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников и др. // Российские нанотехнологии, 2008, Т. 3. № 9-10. С.90.
- [29] **Chkhalo, N.I.** N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 033107.
- [30] **Chkhalo, N.I.** N.I. Chkhalo, E.B. Klunokov, A.E. Pestov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V.603. 2009. Issues 1-2. 2009. P. 62-65.
- [31] **Салащенко, Н.Н.**, Н.Н. Салащенко, А.С. Скрыль, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 14-го международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта 2010, Т. 2. С. 606.
- [32] **Салащенко, Н.Н.** Особенности установки сверхточной оптики в оправы / Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. – V. 5.- С. 3.
- [33] **Гусев, А.** Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм / 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 // Труды 15-го международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 г., т.2, с. 630-631.
- [34] **Пестов, А.Е.** Система освещения маски ЭУФ нанолитографа / А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, А.С. Скрыль, И.Л. Струля, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 14-

го международного симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 15-19 марта 2010 г., т.2, с. 594-595.

[35] **Волгунов, Д.Г.** Стенд проекционного ЭУФ-нанолиитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм / Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. - С. 54.

[36] **Пестов, А.Е.** Моделирование интенсивности излучения рентгеновских трубок в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне / А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72. - С.218.

[37] **Andreev, S.S.** Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications / S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin // Central European Journal of Physics - 2003. – Vol. 1 - P.191.

[38] **Голуб, М.А.**, Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. // Препринт ФИАН. 1981. №29.

[39] **Салащенко, Н.Н.** Анализ применения дифракционных оптических элементов для аттестации асферической оптики с субнанометровой точностью / Н.Н. Салащенко, А.С. Скрыль, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 15-го международного симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 г., т.2, с. 617-618.

[40] **Салащенко, Н.Н.** Проект изготовления российского ЭУФ-нанолиитографа для производства СБИС по технологическим нормам 22 нм / Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. - С. 49.



## Список публикаций

По результатам работ 3 этапа государственного контракта 02.740.11.0540 было опубликовано 10 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах (копия первой и последней страницы статей прилагаются к отчету)

[1] **Aladyshkin, A.Yu.** Mesoscopic cross-film cryotrons: Vortex trapping and dc-Josephson-like oscillations of the critical current / A.Yu. Aladyshkin, G.W. Ataklti, W. Gillijns, I.M. Nefedov, I.A. Shereshevsky, A.V. Silhanek, J. Van de Vondel, M. Kemmler, R. Kleiner, D. Koelle, and V.V. Moshchalkov // *Physical Review B*. – 2011. – Vol. **83**. – N. 144509.

[2] **Aladyshkin, A.Yu.** Giant anisotropy of the resistance induced by magnetic domains in superconductor/ferromagnet hybrids / A.Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, and V.V. Moshchalkov // *Physica C: Superconductivity*. – 2010. – Vol. **470**. – P. 883-885.

[3] **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.

[4] **Капра, А. В.** The guidance of vortex–antivortex pairs by in-plane magnetic dipoles in a superconducting finite-size film / A. V. Kapra, V. R. Misko, D. Y. Vodolazov and F. M. Peeters // *Supercond. Sci Technol*. – 2011. – Vol. 24 -N. 024014.

[5] **Chkhalo, N.I.** Manufacturing of diffraction quality optical elements for high resolution optical systems / N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. // *Proc. of SPIE*. –2010.- Vol. 7521.- P. 752104.

[6] **Барышева, М.** Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии / М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салащенко, И.Л. Струля, Н.И. Чхало // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2011. - Том 75. -С. 71-76.

[7] **Zuev, S. Yu.** Two\_Mirror Projection Objective of a Nanolithographer at  $\lambda = 13.5$  nm/ S. Yu. Zuev, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, A. S. Skryl, I. L. Stroulea, L. A. Suslov, M. N. Toropov, and N. I. Chkhalo // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. - 2011. - Vol. 75. – P. 57.

[8] **Зуев, С.Ю.** Технологический комплекс для изготовления прецизионной изображающей оптики / С.Ю. Зуев, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2011. - Том 75. - С. 57.

[9] **Волгунов, Д.Г.** Стенд проекционного ЭУФ-нанолитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм / Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б.

Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. - С. 54.

[10] **Салащенко, Н.Н.** Проект изготовления российского ЭУФ-нанолиитографа для производства СБИС по технологическим нормам 22 нм / Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. - Том 75. - С. 49.

**Также подготовлено к печати 3 статьи:**

[1] С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, С.А. Гусев, А.Ю. Климов, В.Л. Миронов, В.В. Рогов, А.А. Фраерман// «Туннельное магнитосопротивление двухслойных ферромагнитных наночастиц с магнитостатическим межслойным взаимодействием», (Принято к печати в Известия Академии Наук. Серия Физическая).

[2] D. Yu. Vodolazov and F. M. Peeters, Heating of quasiparticles driven by oscillations of the order parameter in short superconducting microbridges (послано в Physical Review B в феврале 2011).

[3] D. Yu. Vodolazov and F. M. Peeters, Origin of the hysteresis of the current voltage characteristics of superconducting microbridges near the critical temperature (подготовлено к посылке в Physical Review B).

Копии подготовленных к публикации статей прилагаются к отчету.

**Было также сделано 6 докладов на международной конференции “Нанофизика и наноэлектроника 2011”** (г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 года):

[1] **Вдовичев, С.Н.** Магнитные туннельные контакты / С.Н. Вдовичев, Б. А. Грибков, С. А. Гусев, И.Р. Каретникова, А.Ю. Климов, И.М. Нефедов, В.В. Рогов, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 175.

[2] **Путилов, А.В.** Локализованная сверхпроводимость и критические токи в мезоскопических планарных структурах сверхпроводник-ферромагнетик / А.В. Путилов, С.В. Миронов, Д.А. Савинов, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский, А.Ю. Аладышкин // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 296-297.

[3] **Аладышкин, А.Ю.** Захват вихрей и осцилляции критического тока в мезоскопических сверхпроводящих криотронах / А.Ю. Аладышкин, Г.В. Атаклти, В. Гиллийнс, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский, А. Силанек, Й. Ван де Вондел, М. Кеммлер, Р. Клейнер, Д. Кёлле, В.В. Моцалков // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 232-233.

[4] **Водолазов, Д.Ю.** ”Нагрев” квазичастиц в коротких сверхпроводящих микромостиках, вызванный осцилляциями параметра порядка / Д.Ю. Водолазов, Ф. М. Peeters // Труды XV

международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», Нижний Новгород (Россия). – 2011. – С. 196-197.

[5] **Салащенко, Н.Н.** Анализ применения дифракционных оптических элементов для аттестации асферической оптики с субнанометровой точностью / Н.Н. Салащенко, А.С. Скрыль, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 15-го международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2011. - т.2. - С. 617.

[6] **Гусев, А.** Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм / 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 // Труды 15-го международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород -2011. - т.2. С. 630.

Копии первых и последних страниц докладов из конференционных сборников прилагаются к отчету.

### **Проведенные семинары по теме НИР**

Образовательный семинар ИФМ РАН для аспирантов и студентов:  
А.Ю.Аладышкин

**Квантово-размерные эффекты и зарождение сверхпроводимости в гибридных структурах сверхпроводник – ферромагнетик (24 февраля 2011)**

Семинары ИФМ РАН:

1. • М.М.Барышева

**Измерение шероховатости поверхностей в диапазоне пространственных частот 0,001-100 обратных мкм с субнанометровой точностью. (11 марта 2011)**

2. • Д.Ю.Водолазов, F.M. Peeters

**Гистерезис вольтамперных характеристик сверхпроводящих мостиков вблизи критической температуры. (7 февраля 2011)**

3. • А.Ю.Аладышкин

**Визуализация доменной сверхпроводимости в гибридных структурах сверхпроводник-ферромагнетик методом сканирующей лазерной микроскопии. (17 января 2011)**

4. • Д.Ю.Водолазов, F.M. Peeters

**Динамические свойства процесса проскальзывания фазы в коротких сверхпроводящих микромостиках. (13 декабря 2010)**

5. • Н.И.Чхало

**Проблемы и перспективы применения многослойных зеркал для микроскопии в мягком рентгеновском диапазоне. (8 октября 2010)**

6. • А.Ю.Аладышкин

**Транспортные свойства мезоскопических криотронов. (27 сентября 2010)**

«29» апреля 2011 г.

**АКТ  
испытания**

и аттестации волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа

Государственный контракт № 02.740.11.0540 "Рентгенооптические и транспортные свойства металлических наноструктур" от « 22 » марта 2010 г.

Шифр «2010-1.1-121-011-002»

Комиссия в составе:

председатель	<i>Зам. директора, зав. отделом 140</i>	<i>Шашкин Владимир Иванович</i>
членов комиссии	<i>Главный инженер н.с. отд. 140</i>	<i>Дюкин Борис Иванович</i>
	<i>с.н.с. отд. 120</i>	<i>Лукьянов Андрей Юрьевич</i>
секретарь комиссии	<i>с.н.с. отд. 150</i>	<i>Ноздрин Юрий Николаевич</i> <i>Вдовичев Сергей Николаевич</i>

назначенная приказом Учреждения Российской Академии Наук Института физики микроструктур РАН 18 апреля 2011 г. № 025, провела приемочные испытания проекционного объектива нанолитографа (далее – объект испытаний). Место проведения испытаний *ИФМ РАН*.

**1. Комиссией установлено**

1.1. Программа испытаний выполнена полностью.

1.2. Состав и комплектность объекта испытаний соответствует технической документации.

1.3. Объект испытаний и его техническая документация выдержали приемочные испытания.

**2. Выводы**

2.1 Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием.

### 3. Замечания и рекомендации

Опытный образец можно использовать для стенда ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм.

#### Приложения

**A1** Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

**A2** Комплект протоколов испытаний.

Члены комиссии

*В.И. Шашкин*

*Б.И. Дюкин*

*А.Ю. Лукьянов*

*Ю.Н. Ноздрин*

Секретарь комиссии

*С.Н. Вдовичев*

Ведомость соответствия результатов научно-исследовательской работы  
 требованиям технического задания государственного контракта № 02.740.11.0540  
 "Рентгенооптические и транспортные свойства металлических наноструктур" от « 22 »  
 марта 2010 г.  
 Шифр «2010-1.1-121-011-002»

№п/п	Пункт раздела ТЗ и установленные им требования	Полученные результаты	Соответствие результатов требованиям ТЗ
3.6.	Изготовление и аттестация волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа	<p>Разработан, изготовлен и аттестован проекционный объектив Шварцшильдовского типа, образованный двумя асферическими зеркалами, для стенда проекционного нанолитографии с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным пространственным разрешением 30 нм. Числовая апертура объектива составила <math>NA=0,3</math>. Волновая aberrация объектива, до нанесения отражающего интерференционного зеркала Mo/Si, составила 0,9 нм. После нанесения многослойной структуры из-за неполной компенсации механических напряжений в пленках (недокомпенсация составила примерно 10%) aberrация объектива возросла до 1,71 нм. Тем не менее, этого вполне достаточно для получения наноструктур методом проекционной литографии на длине волны 13,5 нм. Работа включала в себя решение таких проблем, как разработка методов аттестации aberrаций</p>	Соответствует

		объектива и коррекции формы подложек для зеркал с субнанометровой точностью, прецизионных методов восстановления аббераций по данным интерферометрического контроля и комплекс других работ, связанных с напылением многослойных структур	
--	--	---	--

## Протокол испытаний волновых деформаций проекционного объектива нанолитографа

1. Наименование организации, проводящей испытание: Учреждение Российской Академии Наук Институте физики микроструктур РАН
2. Заказчик: Институт физики микроструктур РАН
3. Дата испытаний: 19.04.2011 г.
4. Наименование опытного образца: проекционный объектив нанолитографа
5. Методы испытания:
  - а. Аттестация aberrаций сферического волнового фронта, прошедшего через объектив.
6. Описание образцов: объектив состоит из двух асферических зеркал, изготовленных из кварца и вклеенных в металлические оправы и несущей металлической конструкции из инвара. Оправы зеркал прикрепляются к несущей конструкции с помощью пружин. Грубая юстировка зеркал объектива производится с помощью микровинтов, точная – с помощью пьезо-электрических толкателей.
7. Aberrации волнового фронта измеряются с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения. Для этого объектив устанавливается внутрь интерферометра, см. рис. 1. .
8. Результаты испытаний:

Схема и фотография аттестации aberrаций проекционного объектива непосредственно в интерферометре приведены на рисунке 1. Оба источника эталонной сферической волны запитывались излучением одного лазера с длиной волны 530 нм, разделенного с помощью оптоволоконного делителя на два пучка. Длина когерентности лазера (вторая гармоника Nd:YAG лазера) составляла несколько метров.

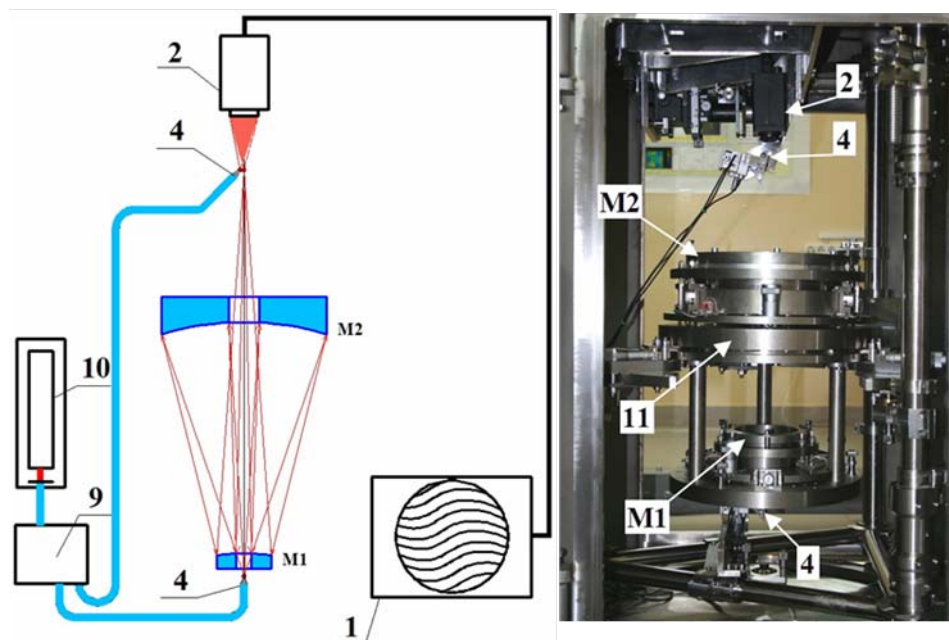
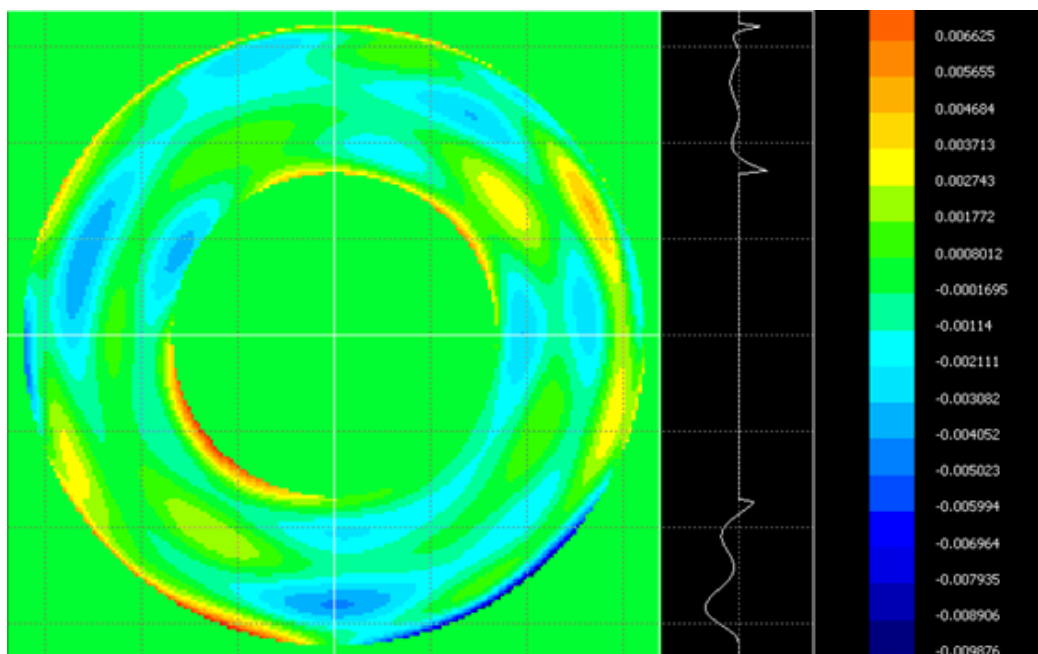


Рисунок 1. Схема аттестации aberrаций проекционного объектива непосредственно в интерферометре. а) – 1- интерферограмма, 2 – CCD камера. 4 – источник сферической волны, 9 – оптоволоконный делитель и контроллер поляризации пучка, 10 – лазер, M1 и M2 – выпуклое и вогнутое зеркала объектива, соответственно, 11- проекционный объектив.

Результат испытаний aberrаций объектива приведен на рис. 2.





**PV=19,4 нм RMS=1,71 нм. Исходное состояние.**

Рисунок 2. Карта aberrаций объектива в интерферометре. Числовая апертура  $NA=0,3$ .

Как видно из карты aberrаций среднеквадратическая aberrация волнового фронта составила 1,71 нм.

- Испытания, проведенные с привлечением научно-исследовательского оборудования ИФМ РАН, показали, что метод аттестации объектива непосредственно в интерферометре обеспечивает измерение aberrаций с субнанометровой точностью, а объектив, после установки в стенд нанолитографа, позволит создавать наноструктуры методом проекционной ЭУФ литографии.

Испытания провел:

инженер отд. 130

Торопов М.Н.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН  
д.ф.-м.н., профессор  
З.Ф. Красильник

«29» апреля 2011 г.

**АКТ**

**испытания**

и аттестации выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива  
нанолиитографа

Государственный контракт № 02.740.11.0540 "Рентгенооптические и транспортные  
свойства металлических наноструктур" от « 22 » марта 2010 г.

Шифр «2010-1.1-121-011-002»

Комиссия в составе:

председатель	<i>Зам. директора, зав. отделом 140</i>	<i>Шашкин Владимир Иванович</i>
членов комиссии	<i>Главный инженер</i>	<i>Дюкин Борис Иванович</i>
	<i>н.с. отд. 140</i>	<i>Лукьянов Андрей Юрьевич</i>
	<i>с.н.с. отд. 120</i>	<i>Ноздрин Юрий Николаевич</i>
секретарь комиссии	<i>с.н.с. отд. 150</i>	<i>Вдовичев Сергей Николаевич</i>

назначенная приказом Учреждения Российской Академии Наук Института физики микроструктур РАН 18 апреля 2011 г. № 025, провела приемочные испытания выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива нанолиитографа (далее – объект испытаний). Место проведение испытаний *ИФМ РАН*.

**1. Комиссией установлено**

1.1. Программа испытаний выполнена полностью.

1.2. Состав и комплектность объекта испытаний соответствует технической документации.

1.3. Объект испытаний и его техническая документация выдержали приемочные испытания.

**2. Выводы**

2.1 Объект испытаний соответствует всем требованиям, заданным техническим заданием.

### 3. Замечания и рекомендации

Опытный образец использовать для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм.

### Приложения

**Б1** Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

**Б2** Комплект протоколов испытаний.

Члены комиссии

*В.И. Шашкин*

*Б.И. Дюкин*

*А.Ю. Лукьянов*

*Ю.Н. Ноздрин*

Секретарь комиссии

*С.Н. Вдовичев*

Ведомость соответствия результатов научно-исследовательской работы  
 требованиям технического задания государственного контракта № 02.740.11.0540  
 "Рентгенооптические и транспортные свойства металлических наноструктур" от « 22 »  
 марта 2010 г.

Шифр «2010-1.1-121-011-002»

№п/п	Пункт раздела ТЗ и установленные им требования	Полученные результаты	Соответствие результатов требованиям ТЗ
3.9.	Изготовление выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива	<p>Разработано, изготовлено и аттестовано выпуклое зеркало М1 для проекционного объектива нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм. На его поверхность нанесена многослойная отражающая структура с коэффициентом отражения на рабочей длине волны около 60%.</p> <p>Разработана методика аттестации формы выпуклых асферических поверхностей с помощью интерферометра со сферической эталонной волной сравнения.</p> <p>Разработана методика установки зеркал в металлические оправы не приводящая к искажениям формы поверхности при установки зеркал в оптические приборы.</p> <p>В рамках данного этапа была изучена возможность применения дифракционных корректоров волнового фронта для решения аналогичных задач. Показано, что традиционный метод расчета дифракционных корректоров волнового фронта, не учитывающий преломление на границах не обеспечивает требуемой субнанометровой и даже нанометровой точности и, соответственно, требуется развитие новых алгоритмов.</p>	Соответствует

## Протокол испытаний

### выпуклого асферического зеркала для проекционного объектива

10. Наименование организации, проводящей испытание: Учреждение Российской Академии Наук Институте физики микроструктур РАН
11. Заказчик: Институт физики микроструктур РАН
12. Дата испытаний: 19.04.2011 г.
13. Наименование опытного образца: выпуклое асферическое зеркало нанолитографа.
14. Методы испытания:
  - а. Измерение коэффициентов отражения многослойного отражающего покрытия в рабочем диапазоне длин волн.
  - б. Аттестация деформаций формы поверхности.
15. Описание образцов: выпуклое асферическое зеркало объектива, фотография приведена на рис. 1, представляет собой кварцевую подложку с отверстием внутри, на поверхность которой нанесены антистрессовая и отражающая излучение в окрестности 13,5 нм многослойные структуры. Зеркало вклеено в инваровую оправу.
16. Коэффициенты отражения в окрестности длины волны 13,5 нм изучались с помощью рентгеновского рефлектометра, оснащенного 5-тиосным гониометром для исследуемого образца двумя степенями свободы для детектора. Аберрации волнового фронта измеряются с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения.
17. Результаты испытаний:

Для соблюдения брэгговского условия характеристики отражающего интерференционного покрытия изучались в 28-ти различных точках исследуемого образца в координатах, указанных в таблице 1 по двум перпендикулярным диаметрам. Как и ожидалось, вращение образца в процессе напыления многослойной структуры обеспечило аксиальную симметрию распределения периода по поверхности, поэтому в таблице приводятся данные только по одному радиусу. Как видно из таблицы 1 максимальное отклонение периода многослойной структуры от номинального значения составило 0,6%, что в 3 раза меньше полосы пропускания всей оптической схемы (2%). Типичная спектральная зависимость коэффициента отражения зеркала приведена на рис. 2.

Таблица 1. Распределение углов падения излучения на первое, рассеивающее, зеркало объектива.

Высота луча на поверхности (мм)	Расчетный угол Брэгга, °	Расчетный период, нм	Измеренный угол Брэгга, °	Измеренный период, нм	Отклонение периода от номинала, %
10	2,72	6,76	5,39	6,78	0,3
15	4,09	6,77	5,39	6,78	0,1
20	5,46	6,78	6,22	6,79	0,1
25	6,86	6,80	6,22	6,79	-0,1
30	8,28	6,82	6,22	6,79	-0,4
32.5	8,99	6,83	6,95	6,80	-0,4
35	9,72	6,85	7,61	6,81	-0,6



Рисунок 1. Фотография выпуклого асферического зеркала М1 в оправе для проекционного объектива нанолитографа.

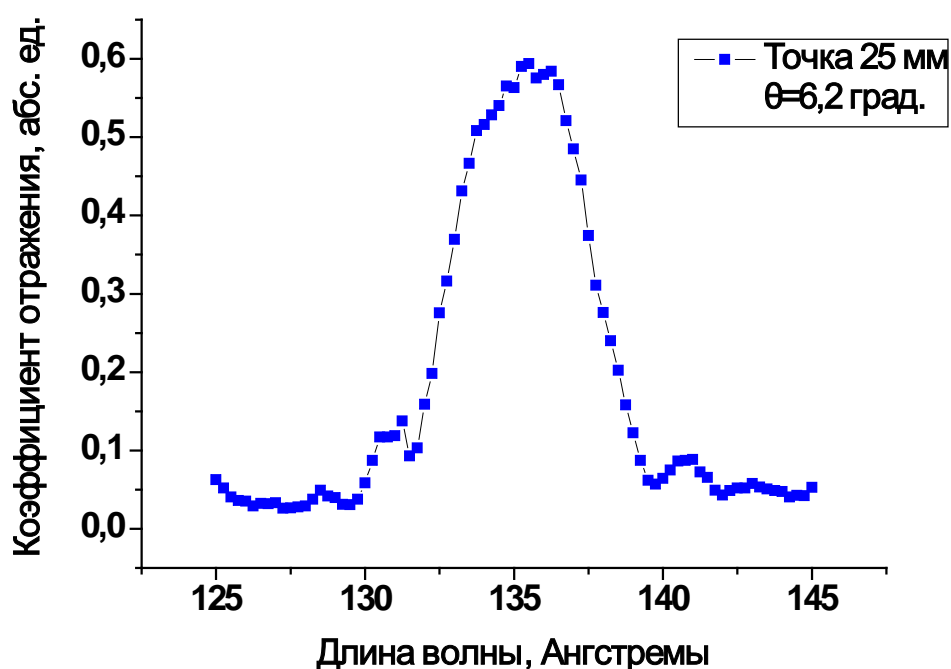


Рисунок 2. Типичная угловая зависимость коэффициента отражения многослойного зеркала М1.

Изучение формы поверхности зеркала осуществлялось с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения. В качестве корректора волнового фронта, преобразующего сферический эталонный фронт в асферический, по форме совпадающий с исследуемой асферикой, использовалось специально рассчитанное, изготовленное и аттестованное с субнанометровой точностью вогнутое асферическое зеркало. Результаты аттестации (карта отклонений формы поверхности от расчетной) приведены на рис. 3. Как видно из рисунка корень квадратный из среднеквадратического отклонения формы поверхности от расчетной составил менее 1 нм.

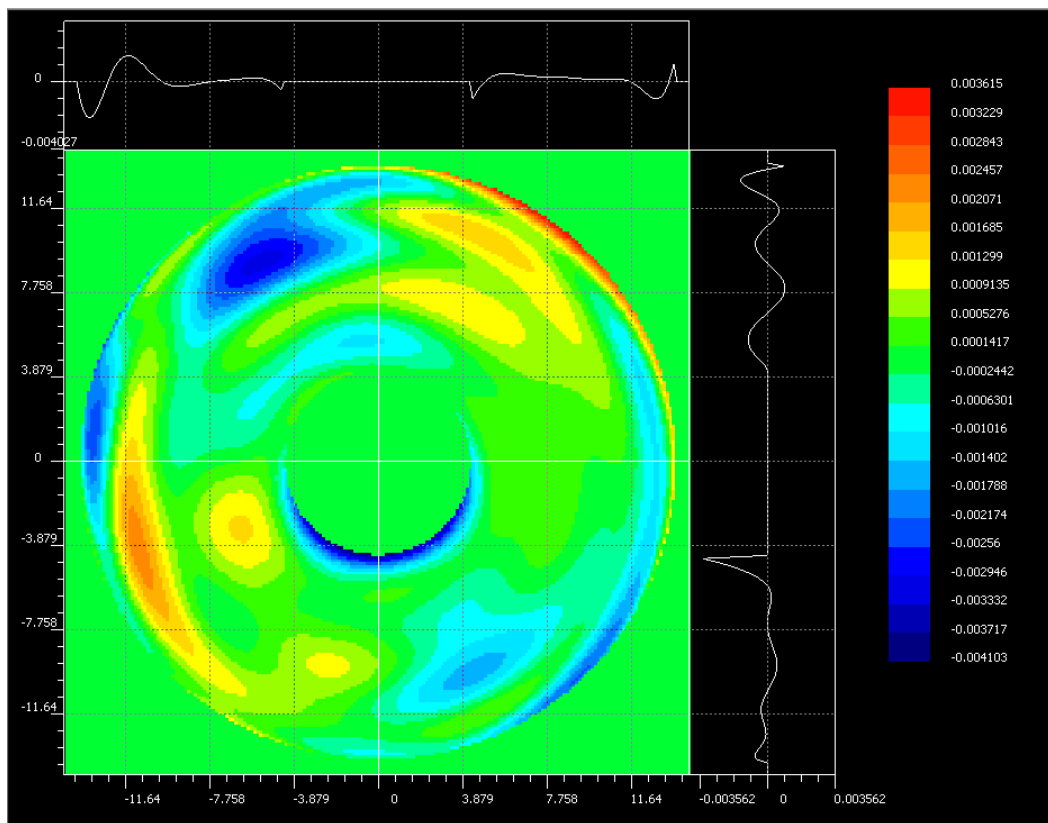


Рисунок 3. карта отклонений формы поверхности выпуклого зеркала М1 нанолитографа от расчетной.  $RMS=0,9$  нм.

18. Испытания, проведенные с привлечением научно-исследовательского оборудования ИФМ РАН, показали, что выпуклое зеркало после установки в объектив, позволит достичь пространственное разрешение, лежащее в нанометровом диапазоне.

Испытания провел:

инженер отд. 130

Торопов М.Н.