

**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  
«30» апреля 2010 г.**

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

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

**по теме:**

**РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
НАНОСТРУКТУР**

**(промежуточный)**

Наименование этапа: “Выбор направления исследований, построение теоретических моделей, изготовление образцов.”

Руководитель НИР:

\_\_\_\_\_

С. В. Гапонов

подпись, дата

**Нижний Новгород 2010**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, советник РАН, академик	_____	С. В. Гапонов (введение, раздел 1)
	подпись, дата	
Исполнители темы:		
Член.-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав.отд.	_____	Н.Н. Салашенко (раздел 6-8)
Зам. директора, д.ф.-м.н., с.н.с	_____	А.А. Фраерман (раздел 1,4-5, заключение)
Зам. директора, д.ф.-м.н., с.н.с	_____	А.С. Мельников (раздел 1, 3, заключение)
зав.лаб., д.ф.-м.н.	_____	Н.И. Чхало (введение, раздел 6- 8, приложение В, Г)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С. А. Гусев (раздел 1)
С.н.с., к.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 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	И.Д. Токман (раздел 1)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	С.В. Шаров (раздел 1, 3)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Ю. Аладышкин (раздел 1, 2)
С.н.с., к.ф.-м.н.	_____	Д.Ю. Водолазов (введение, раздел 1, заключение)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	С.Н. Вдовичев (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	М. М. Барышева (раздел 1, 8)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	Б.А. Грибков (раздел 1)
Н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Е. Пестов (раздел 1, 6-8, приложение В, Г)

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

Студент	_____	(раздел 1, 6) Д. Н. Рогачев
Студент	_____	(раздел 1, 6) А.С. Скрыль
Студент	_____	(раздел 6) Р.А. Храмков
	_____	(раздел 8)

## Реферат

Отчет 114с., 8 ч., 4 прил., 28 рис., 113 источников.

### НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ, ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ, МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ, МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ, НАНОЛИТОГРАФИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 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.

Цель работы — выполнение ряда технологических, экспериментальных и теоретических работ, направленных на получение новых фундаментальных знаний о рентгенооптических и транспортных свойствах металлических наноструктур. При этом работы проводились в следующих основных направлениях: (а) развитие методов создания и рентгенооптической диагностики структурных свойств металлических (магнитных, сверхпроводящих, а также гибридных) наноструктурированных систем, (б) исследование особенностей транспортных свойств таких систем в широком диапазоне температур и магнитных полей, (в) исследование физики взаимодействия разных типов упорядочивания (магнитного и сверхпроводящего) в наноструктурированных системах.

На первом этапе проекта нами были проведены предварительные исследования с целью определения и обоснования оптимального варианта выполнения работ для решения поставленных задач на основе анализа состояния исследуемой проблемы и сравнительной оценки вариантов возможных решений с учетом результатов прогнозных исследований, проводившихся по аналогичным проблемам. Эта предварительная работа включала всесторонний анализ существующей литературы по тематике проекта, системный поиск данных по исследуемой проблеме в российских и зарубежных электронных базах данных. Кроме того, нами были проведены патентные исследования по теме проекта. После таких предварительных работ мы приступили непосредственно к решению задач проекта, намеченных на первом этапе.

Нами выполнена разработка пакета программ для расчета транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников с несверхпроводящими дефектами различной формы в присутствии заданного неоднородного магнитного поля. Этот программный комплекс предполагается активно использовать на следующих этапах проекта. В основу модели положено нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау. Важным элементом программ является разработанный авторами новый метод и численный алгоритм решения уравнения Пуассона для электрического потенциала, позволяющий вычислять потенциал в областях сложной структуры с эффективностью, сравнимой с эффективностью Фурье-алгоритма в прямоугольных областях. Пакет представляет собой гибкое модифицируемое Windows-приложение с графическим интерфейсом, позволяющим, в частности, наблюдать за динамикой параметра порядка, тока и движением вихрей в пленке непосредственно в процессе моделирования. Для демонстрации возможностей программ были рассмотрены модельные задачи о переходе мезоскопического сверхпроводника квадратной формы из сверхпроводящего состояния в нормальное и резистивное состояния под действием стационарного стороннего тока. В дальнейшем пакет программ будет использован при выполнении запланированных работ (работы 3.2, 5.4, 5.5, 6.2, 6.3 в соответствии с календарным планом).

Выполнен также запланированный на первый этап расчет локализационных поправок к проводимости двумерного электронного газа в неоднородном магнитном поле. Особое внимание было уделено расчетам пространственно усредненной поправки к проводимости, которая является экспериментально измеряемой величиной, определяющей вольтамперную характеристику образца. Теоретически описаны основные режимы слабой локализации, реализующиеся при различных параметрах рассматриваемых гибридных систем. Предсказано существование эффекта положительного магнитосопротивления электронной подсистемы во внешнем однородном магнитном поле. Данный эффект проявляется в существенной немонотонности зависимостей пространственно усредненной проводимости от величины внешнего однородного магнитного поля, которые имеют резкие провалы, соответствующие равенству напряженности внешнего однородного поля амплитудному значению поля магнитной подсистемы. Очевидной причиной возникновения немонотонных зависимостей является эффект частичной компенсации магнитного поля в пространственных областях, в которых среднее поле и поле магнитной подсистемы противоположно направлены. Показано, что данный эффект сильно зависит от пространственной конфигурации магнитного поля, создаваемого магнитной подсистемой.

Для двух модельных конфигураций периодического магнитного поля в рамках локального приближения получены условия существования положительного магнитосопротивления.

В лаборатории математического моделирования ИФМ РАН разработан пакет программ SIMMAG (SIMulation of MicroMAGnets) для моделирования динамики и стационарных распределений намагниченности магнитных как одно- так и многослойных наночастиц различной формы, взаимодействие частиц, влияние внешнего магнитного поля, в том числе переменного, неоднородного и случайного (моделирующего тепловые флуктуации), моделирование магнито-силового изображения частицы и многие другие. Пакет основан на численном решении уравнения Ландау-Лившица-Гильберта (ЛЛГ), описывающего динамику намагниченности в частице. Эффективное магнитное поле, входящее в это уравнение, может включать в себя поле магнитостатического взаимодействия, поле обмена, поле анизотропии и внешнее магнитное поле, которое может быть как неоднородным по пространству и/или переменным по времени, так и тепловым. Данный пакет программ будет использован при выполнении запланированных работ (работы 2.1, 2.2 в соответствии с календарным планом).

В рамках изучения магнитных свойств металлических наноструктур построена феноменологическая теория, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности. Данная теория показывает, что в средах с некомпланарной неоднородной магнитной структурой возможен ряд новых по сравнению с компланарными средами эффектов. В частности, «топологический» эффект Холла, эффект выпрямления электрического тока, а также явление оптической активности в таких средах могут быть качественно описаны в рамках предложенной теории. Для возникновения «топологического» эффекта Холла необходимо, чтобы намагниченность в системе изменялась как минимум по двум координатам. Примерами таких систем являются микрочастицы с вихревым и антивихревым распределением намагниченности. Эффект выпрямления электрического тока и оптическая активность возникают в средах, магнитная структура которых не обладает центром инверсии и изменяется как минимум по одной координате. Примером такого распределения намагниченности является конусная спираль, реализующаяся в редкоземельных металлах Ho, Er, Dy, в ряде соединений (MnSi, FeGe), а также в ферромагнитных наноструктурах.

Так же начата практическая работа по созданию стенда нанолитографа. В частности, создано асферическое зеркало проекционного объектива с точностью формы по параметру среднеквадратического отклонения от требуемой  $RMS=0,89$  нм, что соответствует

критерию Марешаля ( $RMS < \lambda/14$ ) для оптики дифракционного качества. Решение этой задачи потребовало разработки новых схем изучения формы вогнутых асферических поверхностей с помощью интерферометра со сферической эталонной волной, технологии коррекции формы с субнанометровой точностью с помощью ионно-пучкового травления, с сохранением микрошероховатости поверхности на субнанометровом уровне, методов измерения микрошероховатости атомарно-гладких поверхностей, нанесение многослойных отражающих излучение  $\lambda = 13,5$  нм интерференционных покрытий с компенсированными внутренними напряжениями, и ряд других исследований и разработок, сделанных, как в предыдущий период, так и непосредственно в рамках данного контракта. Изучено влияние внешних условий (гравитация, установка зеркала в металлические оправы) на форму поверхности сверхточной оптики и найдены решения, позволяющие устанавливать такую оптику в приборы без деформации формы.

В лаборатории диагностики многослойных структур и перспективного приборостроения с целью масштабных исследований в области проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона, являющейся наиболее вероятным кандидатом для массового производства элементов нанoeлектроники (чипов) по технологическим нормам 32-22-16 нм, разработана базовая рентгенооптическая схема нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм. На основе этой схемы начата конструкторская разработка прибора с расчетным пространственным разрешением 30 нм. В качестве проекционного объектива используется двухзеркальная схема Шварцшильда с увеличенным полем зрения за счет применения асферических зеркал. В схеме заложен значительный потенциал для увеличения пространственного разрешения до 16 нм без замены других рентгенооптических элементов.

В лаборатории технологии многослойной рентгеновской оптики были синтезированы многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов La/B<sub>4</sub>C. Структурные свойства образцов изучались методом малоугловой рентгеновской дифракции с использованием новой методики, позволившей восстановить профиль диэлектрической проницаемости по данным угловых зависимостей коэффициента отражения на длине волны 13,5 нм. Так же изучены рентгенооптические свойства образцов в области аномальной дисперсии бора. Синтезированные структуры обладали рекордными коэффициентами отражения при скользющем и нормальном падении, однако при нормальном падении почти в 2 раза уступают теоретическому пределу. Показано, что основной причиной этого является взаимная диффузия материалов, приводящая к размытию скачка диэлектрической проницаемости на границе и, как следствие, к падению



коэффициентов отражения. Для структур с большим периодом этот эффект ослабевает и коэффициенты отражения стремятся к теоретическим значениям. Учитывая сложности в определении оптических констант пленок лантана в этой области, данный факт стал косвенным подтверждением достоверности их теоретических значений. Так же были синтезированы образцы с различными антидиффузионными барьерами. Эффект этих слоев оказался либо нейтральным, при нанесении барьерных слоев на гетерограницу  $La$ -на- $B_4C$ , либо негативным, при нанесении на противоположную гетерограницу.

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

- 1) Пакет программ для расчета транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников с несверхпроводящими дефектами различной формы в присутствии заданного неоднородного магнитного поля.
- 2) Теоретическая модель проводимости двумерного электронного газа в неоднородном магнитном поле, созданного доменной структурой ферромагнитной пленки.
- 3) Программа для моделирования равновесных магнитных состояний в многослойных частицах, содержащих несколько слоев ферромагнетика, разделенных немагнитной прослойкой.
- 4) Теоретическая модель, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности.
- 5) Экспериментальный образец вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива.
- 6) Рентгенооптическая схема нанолитографа с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным разрешением 30 нм на основе асферического двухзеркального объектива Шварцшильда.
- 7) Экспериментальные образцы  $La/B_4C$  многослойных структур с антидиффузионными слоями и их отражательные характеристики в области аномальной дисперсии оптических констант бора.

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по I этапу, а также отчет по патентным исследованиям по теме проекта. По полученным результатам опубликована 1 статья и направлено 8 статей в реферируемые журналы. Большая часть полученных результатов также докладывалась на 14-ом Международном симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника» (15-19 марта 2010 г., Нижний Новгород) – 1 приглашенный, 2 устных и 5 стендовых докладов.

## Содержание

Введение.....	13
1. Выбор и обоснование принятого направления исследований и способов решения поставленных задач .....	14
2. Программа для расчета транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников с несверхпроводящими дефектами различной формы и исследования динамики вихрей в таких структурах .....	24
3. Модель, описывающая локализационные поправки к проводимости двумерного электронного газа в неоднородном магнитном поле .....	28
4. Программа для моделирования равновесных магнитных состояний в многослойных частицах, содержащих несколько слоев ферромагнетика, разделенных немагнитной прослойкой.....	34
5. Теоретическая модель, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности .....	37
6. Рентгенооптическая схема EUV нанолитографа на основе асферического двухзеркального объектива Шварцшильда .....	40
7. Экспериментальный образец вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива .....	47
8. Экспериментальные образцы La/B <sub>4</sub> C многослойных структур с антидиффузионными слоями и изучение их отражательных характеристик и структурных параметров .....	53
Заключение.....	66
Список использованных источников.....	67
Приложение А. Акт изготовления вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива .....	78
Приложение Б. Акт изготовления La/B <sub>4</sub> C многослойных структур с антидиффузионными слоями.....	84
Приложение В. Отчет о патентных исследованиях вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива.....	90
Приложение Г. Отчет о патентных исследованиях лантан-боросодержащих многослойных зеркал для спектральной области аномальной дисперсии бора .....	103

## Обозначения и сокращения

1. S/F – сверхпроводник/ферромагнетик
2. ТМС – туннельное магнитосопротивление
3. ГМС – гигантское магнитосопротивление
4. нм – нанометр
5. мкм - микрометр
6. АЛ – Асламазова-Ларкина
7. МТ – Маки-Томпсона
8. ОПС – одноэлектронная плотность состояний
9. СТС – сканирующая туннельная спектроскопия
10. СП – сверхпроводящий
11. 2D – двумерный
12. 3D – трехмерный
13. МС – многослойная структура
14. EUV – extreme ultraviolet

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

## **Введение**

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 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.

Цель работы — выполнение ряда технологических, экспериментальных и теоретических работ, направленных на получение новых фундаментальных знаний о рентгенооптических и транспортных свойствах металлических наноструктур. При этом работы проводились в следующих основных направлениях: (а) развитие методов создания и рентгенооптической диагностики структурных свойств металлических (магнитных, сверхпроводящих, а также гибридных) наноструктурированных систем, (б) исследование особенностей транспортных свойств таких систем в широком диапазоне температур и магнитных полей, (в) исследование физики взаимодействия разных типов упорядочивания (магнитного и сверхпроводящего) в наноструктурированных системах.

## **1. Выбор и обоснование принятого направления исследований и способов решения поставленных задач.**

Проекционная литография экстремального ультрафиолетового диапазона, с длиной волны около 10 нм, рассматривается как наиболее реальная альтернатива традиционной фотолитографии глубокого ультрафиолетового диапазона с длиной волны 193 нм. Основными преимуществами этой технологии являются высокая производительность, низкая дефектность рисунка и возможность формирования рисунков на больших площадях. Малая длина волны позволяет достичь пространственного разрешения менее 10 нм. Исследования в области проекционной ЭУФ литографии были начаты в США, и быстро подхвачены в Европе и Японии с середины 90-х годов прошлого столетия. Первые успехи на длине волны 13.5 нм были продемонстрированы уже в 2002 г., когда с четырехзеркальным объективом с числовой апертурой  $NA=0.1$  был достигнут дифракционный предел разрешения 70 нм [1]. Реальные прототипы промышленной установки проекционной EUV-литографии были изготовлены в 2006 г. в компании ASML. Два сканнера (EUV Alpha Demo Tool) с шестизеркальным объективом с  $NA=0.15-0,25$  обеспечивают минимальную ширину линий 30-32 нм [2]. В работе [3] сообщается о достижении разрешения 26-28 нм.

В России систематические исследования по EUV литографии ведутся только в ИФМ РАН [4]. ИФМ РАН является признанным мировым лидером в области технологии роста многослойных интерференционных структур для управления пространственными и угловыми (фокусировка, коллимация, построение изображений), а также поляризационными характеристиками рентгеновских пучков [5,6,7]. В институте разработаны передовые методы изучения дисперсионных характеристик и структурных параметров многослойных интерференционных структур [8,9], существующие только в нескольких синхротронных центрах мира. В частности, разработана методика, впервые позволяющая по данным малоуглового рассеяния жесткого рентгеновского излучения разделить вклады диффузионного перемешивания материалов и геометрической шероховатости границ в ширину переходных областей на гетерограницах [10], а также технология мирового уровня для коррекции формы оптических элементов с субнанометровой точностью методом ионно-пучкового травления [11] и оригинальный, обеспечивающий рекордную точность измерений в большой угловой апертуре, вакуумный интерферометр [12].

Среди исследований по EUV литографии других отечественных групп, следует отметить работы по мощным газоразрядным источникам EUV излучения и методам

защиты зеркал от загрязнений продуктами эрозии конструкционных материалов и от бомбардировки быстрыми ионами и нейтральными частицами, проводимые в ИС РАН и ТРИНИТИ, г. Троицк [13], и разработку фоторезистов на основе халькогенидов (ФТИ РАН, г. Санкт-Петербург) [14].

Таким образом в рамках проекта будет изучено влияние барьерных (антидиффузионных) слоев на оптические и транспортные свойства гетероструктур, представляющих наибольший интерес для рентгенооптики, прежде всего оптики проекционных наноитографов экстремального ультрафиолетового диапазона, магнитной памяти и сверхпроводящих наноструктур. Значительное внимание будет уделено теоретическому изучению искажений волновых фронтов, вызванных фазовыми нарушениями отраженной от многослойного зеркала волны и связанными с особенностями брэгговских отражателей. Этой проблемой занимаются в Институте кристаллографии РАН, г. Москва. Однако исследования ограничены рассмотрением простейшей задачи отражения от структуры с изменяющимися в глубину толщинами пленок, без учета их продольного градиента и наличия топологического рисунка с характерными масштабами порядка длины волны излучения и периода многослойной структуры [15]. За рубежом эти исследования проводятся в рамках развития проекционной наноитографии 13.5 нм и носят закрытый характер.

Широко известны работы ИФМ РАН в области транспортных свойств сверхпроводниковых мезоскопических систем – области исследований бурно развивающейся последние 15 лет в мире. При анализе специфики вихревых систем в наноструктурированных сверхпроводниках можно отметить цикл работ, посвященных анализу нетривиальных вихревых конфигураций в мезоскопических системах, где роль параметра, контролирующего транспорт, играет магнитное поле, изменяющее число и конфигурацию вихрей. За счет баланса конкурирующих сил, действующих на вихри со стороны экранирующего тока, текущего вдоль границы образца, и сил отталкивания между отдельными вихрями оказывается возможным существование экзотических вихревых состояний – многоквантовых (гигантских) вихрей и вихревых кластеров с размером меньшим длины когерентности [16-22]. Наряду с детальным исследованием структуры параметра порядка в экзотических конфигурациях естественный интерес исследователей вызывает развитие теории электронных состояний в таких системах. При этом представляется необходимым выполнить как обобщение теории Caroli – de Gennes – Matricon [23] на случай многоквантовых вихрей и вихревых молекул, так и учесть специфику электронных состояний связанную с нормальным отражением на краях образца.

Вопрос об описании механизма пиннинга вихрей на протяженных дефектах анализировался ранее на основе феноменологических теорий в большом количестве работ (см., например, [24-26] и приведенные в них ссылки). Последовательный микроскопический подход был ранее применен лишь для пиннинга вихрей на точечных дефектах с малым сечением рассеяния [27]. Обобщение микроскопического анализа на случай протяженных дефектов различного типа и размеров представляет несомненный интерес для понимания природы пиннинга и динамики вихревых линий, колеблющихся вокруг дефектов при приложении переменного тока. С точки зрения вычисления спектра квазичастиц, планируемая нами работа представляет собой развитие работ [28], в которых рассматривалась модификация спектров под влиянием точечных примесей в корях двумерных вихрей. Для анализа динамики вихрей в поле дефектов мы планируем использование микроскопических подходов, подробно описанных в [29,30].

В настоящее время сверхпроводящие металлические нанопроволоки используются в качестве основного базового элемента в однофотонных квантовых детекторах (ОКД) [31-32]. Подобные приборы находят свое применение как в астрофизике (детектирование космического излучения) так и в практике, в качестве приемного устройства в оптоволоконных линиях связи. Работа устройства базируется на локальном разрушении сверхпроводимости (за счет поглощения одного фотона) и появлении импульса напряжения (связанного с появлением одного или нескольких центров проскальзывания фазы) в сверхпроводящей проволоке, по которой течет транспортный ток. Задача об условиях существования ЦПФ в сверхпроводящих каналах имеет длинную историю (см. например обзоры [33,34]), но, несмотря на это недавно были получены новые результаты, проясняющие условия возникновения ЦПФ [35,36]. Однако практически все теоретические исследования были основаны на решении нестационарных уравнений Гинзбурга-Ландау и поэтому имеют узкую область применимости вблизи критической температуры  $T_c$  сверхпроводника. Однако рабочий диапазон температур однофотонного квантового детектора лежит намного ниже  $T_c$ . Для исследования свойств ЦПФ при низких температурах планируется использовать численный расчет уравнения Узаделя для функции Грина электронов и уравнения Больцмана для функции распределения квазичастиц [37,38]. Планируется установить условия существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих проволоках в зависимости от времени релаксации неравновесной функции распределения квазичастиц, длины проволоки и приложенного магнитного поля при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода. Решение этих вопросов позволит теоретически



оценить пригодность различных сверхпроводников в качестве элемента ОКД и определить область токов, оптимальных для детектирования фотонов.

Возникновение сверхпроводимости, локализованной вблизи доменной стенки в ферромагнитных сверхпроводниках [39], в целом аналогично явлению поверхностной сверхпроводимости. Неоднородное магнитное поле, создаваемое магнитными доменами, сильно влияет на условия возникновения сверхпроводимости: сверхпроводимость возникает в виде зародышей, локализованных над доменными стенками. Это приводит к необычной фазовой диаграмме планарных гибридных SF систем [40-42] во внешнем магнитном поле: возможен режим возвратной сверхпроводимости (“reentrant superconductivity”), при которой зависимость  $T_c(H)$  оказывается немонотонной. Подобная немонотонная (осциллирующая) зависимость критической температуры  $T_c$  от внешнего магнитного поля  $H$  наблюдается и в гибридных SF системах с магнитными частицами. В этом случае неоднородное магнитное поле частицы создает область локализации сверхпроводящего зародыша в форме замкнутой петли, а условия возникновения сверхпроводимости определяются магнитным потоком через контур этой петли [43], аналогично эффекту Литтла-Паркса. Мы планируем исследования локализованной сверхпроводимости в новых классах гибридных структур: ферромагнетик – сверхпроводник первого рода, сверхпроводник – парамагнетик или два сверхпроводника с различными  $T_c$ , где определяющим должно быть изменение структуры магнитного поля при образовании сверхпроводящей/нормальной области.

С участием авторов проекта был предложен и успешно реализован новый тип гибридных SF систем. Данные системы представляют собой джозефсоновский контакт, помещенный в поле субмикронных ферромагнитных частиц [44-47]. В работах экспериментально наблюдалась существенная зависимость критического тока  $I_c$  от магнитного состояния частиц  $S_0$ . Были обнаружены особенности дифракционной картины в виде регулярных пиков на зависимости  $I_c$  от внешнего магнитного поля  $H$ , приложенного в плоскости перехода. Это доказывает существования эффектов соизмеримости между периодическим распределением разности фаз, создаваемым полем рассеяния магнитных частиц, и пространственной волной джозефсоновского тока, формируемой внешним однородным полем. В тоже время нестационарные эффекты (ВАХ, ступеньки Фиске) пока остались неизученными. Мы планируем рассмотреть влияние мелкомасштабной модуляции джозефсоновской разности фаз, на ток-фазовое соотношение контакта, в частности изучить возможность реализации  $P_i$ -состояния в такой системе.

Известно, что сильное уменьшение критического тока сверхпроводников во внешнем магнитном поле значительно уменьшает перспективы использования сверхпроводников в технике. Одним из методов решения этой проблемы является использование магнитных экранов [48-51]. В настоящее время основная экспериментальная работа ведется со сверхпроводниками в которых существует объемный пиннинг вихрей. В таких сверхпроводниках из-за экранирования внешнего магнитного поля полем магнитного экрана локальная плотность тока пиннинга возрастает, и это приводит к увеличению критического тока. Экспериментально было установлено, что такой метод ведет к увеличению критического тока во внешнем магнитном поле в проволоках MgB<sub>2</sub> окруженных железом Fe [49], в пленках BSCCO покрытых никелем Ni [50] и к уменьшению потерь на переменном токе в пленках BSCCO покрытых Ni [51]. Очевидно, что эффект магнитного экрана будет наиболее заметен в случае сильной зависимости плотности тока пиннинга от локального магнитного поля. Известно, что эффекты, связанные с поверхностным барьером для входа вихрей подавлены уже в относительно слабых магнитных полях. В наших работах [52,53] наличие слоя кобальта привело к увеличению критического тока на 100% в ниобиевой пленке с поверхностным барьером. Мы планируем учесть влияние объемного пиннинга вихрей, а также рассмотреть влияние ферромагнитных структур двух типов:

- 1) размагниченный ферромагнетик с доменной структурой и с вектором намагниченности перпендикулярным плоскости сверхпроводящей пленки;
- 2) ферромагнетик, намагниченный параллельно плоскости пленки и перпендикулярно направлению транспортного тока.

Особый интерес привлекают гибридные системы ферромагнетик – двумерный электронный газ в связи с возможностью управления электронным транспортом посредством изменения распределения намагниченности в ферромагнитной подсистеме [54,55]. Большое внимание проблеме влияния неоднородного магнитного поля на электронную проводимость в двумерных системах обусловлено возможностью использования таких систем для создания высокочувствительных детекторов неоднородного магнитного поля. Многочисленные теоретические исследования влияния магнитного поля на проводимость двумерного электронного газа основаны, как правило, на классических или полуклассических приближениях, которые справедливы, если длина свободного пробега электрона много больше фермиевской длины волны. Эти расчеты не учитывают эффекты слабой локализации, обусловленные квантовомеханической интерференцией между амплитудами вероятностей различных квазиклассических электронных траекторий. Внешнее магнитное поле, приложенное к образцу, разрушает

когерентность замкнутых траекторий, что приводит к уменьшению модуля локализационной поправки и исчезновению расходимости поправки в пределе нулевой температуры. К настоящему времени известно лишь несколько точных аналитических выражений для величины локализационной поправки к проводимости в полях специального вида [56,57]. Однако поведение локализационной поправки в неоднородном магнитном поле до сих пор не описано аналитически. В частности, до конца не исследован вопрос о влиянии такого поля на расходимость локализационной поправки в области низких температур. Это одна из задач данного проекта.

Флуктуационная добавка к проводимости (парапроводимость) тонких сверхпроводящих пленок и каналов связана с возможностью флуктуационного рождения куперовских пар, описывается теорией Асламазова-Ларкина и является предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Вклад флуктуаций оказывается особенно сильным для низкоразмерных систем во внешнем магнитном поле, и может служить своеобразным тестом для определения размерности сверхпроводящей области. В случае доменной сверхпроводимости вклад флуктуаций в проводимость локализованного сверхпроводящего канала должен быть существенным и определять форму резистивного перехода. Поэтому теоретическое изучение влияния неоднородного поля магнитных доменов или частиц на флуктуационную проводимость важно для правильной интерпретации экспериментальных результатов.

В большинстве теоретических работ при анализе свойств гибридных S/F структур предполагалось наличие жесткой магнитной структуры, не зависящей от внешнего поля и распределения сверхпроводящих токов (см. обзор [58]). Тем не менее, в ряде работ в лондонском приближении исследуется обратное влияние сверхпроводимости на магнитную структуру ферромагнетика, приводящее к изменению периода равновесной доменной структуры в пленках с продольной и перпендикулярной ориентацией намагниченности [59-64], перемагничиванию наночастиц [65,66] а также был исследован [67-69] пиннинг вихрей на магнитном диполе с моментом, способным свободно вращаться под действием внешнего магнитного поля и/или транспортного тока. Однако недостатком лондонской теории является то, что она не учитывает пространственное изменение плотности сверхпроводящих электронов, что оказывается важным на малых (нанометровых) масштабах, соизмеримых с размером кора вихря. В рамках теории Гинзбурга-Ландау мы исследуем особенности формирования и динамики вихревых структур в магнитомягких гибридных S/F структурах с магнитной связью. Для описания динамики свободно вращающегося магнитного момента планируется использовать уравнение Ландау-Лифшица (в общем случае) или предположение о том, что в каждый

момент времени магнитные частицы ориентируют свой дипольный момент таким образом, чтобы минимизировать свою потенциальную энергию. Мы ожидаем, что гибридные S/F системы, состоящие из сверхпроводника и магнитомягкого материала, будут обладать магнитными и транспортными свойствами, отличающимися от характеристик S/F структур с заданной намагниченностью, и тем самым, представлять несомненный интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для решения прикладных задач.

Одним из сравнительно новых и перспективных направлений научных исследований ИФМ РАН является разработка магнитных наноструктур для создания приборов спинтроники. Интерес к спин-зависящим процессам, влияющим на движение носителей тока в твердых телах, в последнее время значительно возрос [70]. С фундаментальной точки зрения, этот интерес обусловлен недостаточностью знаний о взаимосвязи движения электрона в реальном пространстве с динамикой его собственного магнитного момента – спина. С практической точки зрения, углубление этих знаний может привести к созданию нового класса приборов. Доказательством такой возможности послужило открытие эффектов гигантского (ГМС) и туннельного (ТМС) магнитосопротивления в многослойных структурах, содержащих слои ферромагнитных металлов [71,72]. Эти эффекты проявляются в увеличении на десятки процентов сопротивления многослойной структуры при переходе от параллельной ориентации магнитных моментов ферромагнитных слоев к антипараллельной. Дальнейшее продвижение в этой области связано с открытием явления перемагничивания при протекании спин-поляризованного электрического тока [73]. Перечисленные эффекты лежат в основе созданных и разрабатываемых систем для детектирования магнитного поля и записи информации.

Особо следует отметить некоторое отставание работ отечественных исследователей в области экспериментального изучения туннельного магнитосопротивления в многослойных структурах с ферромагнитными слоями и разработки новых приборов на основе этого эффекта. Продвижения в этой области удалось достигнуть группе из ИРЭ РАН, синтезировавшей трехслойную структуру  $\text{Ru}$  (пермаллой) / $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Co с магнитосопротивлением порядка 10% [74]. Однако, латеральные размеры полученных образцов пока слишком велики ( $\sim 100$  мкм) как для практических применений, так и для постановки экспериментов по перемагничиванию за счет спиновой инжекции. Отметим, что недавно нами получена структура, состоящая из двух ферромагнитных частиц субмикронных размеров, разделенных туннельно-прозрачной прослойкой и демонстрирующая ТМС-эффект  $\sim 3\%$  при комнатной температуре [75].

В рамках данного контракта предлагается исследовать латерально-ограниченные многослойные структуры, содержащие сверхтонкие слои ферромагнитных металлов. Такие структуры будут созданы методом электронной литографии из многослойных образцов, полученных различными методами вакуумного напыления. Минимальный диаметр многослойных частиц составляет 20 нм, а толщина отдельного слоя  $\sim 10$  нм. Ограниченность ферромагнитных слоев в плоскости образца ведет к сильному магнитостатическому взаимодействию между ними. В частности, основное состояние системы, состоящей из двух ферромагнитных слоев, разделенных немагнитной (диэлектрической) прослойкой является антиферромагнитным. Это обстоятельство может быть полезным для наблюдения спин - вентильного эффекта. Основное внимание мы планируем уделить изучению особенностей протекания тока в таких структурах.

Таким образом, данный проект направлен на решение проблем, привлекающих большой интерес исследователей во всем мире. Предварительные результаты, полученные в этой области авторами данного проекта, являются приоритетными, и их дальнейшее развитие позволит сделать важный шаг на пути к пониманию физики твердотельных наноструктур. Объединение усилий групп из нашего научного коллектива, наличие соответствующей экспериментальной базы и высокая квалификация исполнителей позволяет выполнить намеченные исследования на мировом уровне.

В заключении приведем основные теоретические модели и экспериментальные результаты (образцы) которые должны быть получены, разработаны и изготовлены в ходе выполнения НИР:

- образцы отрезающих фильтров для проекционной нанолитографии, в количестве достаточном для изучения их механических свойств, стойкости к мощным, до 3 Вт/см<sup>2</sup>, потокам излучения и химической стойкости при воздействии агрессивных газов (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), их атомов и ионов в условиях высоких, до 500С, а также для применения в разрабатываемом макете ЭУФ нанолитографа;
- физическая модель и пакет прикладных программ по восстановлению основных геометрических (толщины пленок и ширины межслоевых областей, период), материальных (плотности материалов пленок) и структурных (диффузионное перемешивание и шероховатость границ, микроструктура материалов пленок) характеристик многослойных гетероструктур по данным малоугловой и широкоугловой дифракции жесткого рентгеновского излучения. Применение этого

метода для изучения рентгеновских, магнитных и сверхпроводящих наноструктур, разработанных в рамках данного проекта;

- пакет прикладных программ для расчета коэффициентов отражения рентгеновского излучения многослойными зеркалами при наличии на их поверхности поглощающих наноструктур с топологическими размерами, соизмеримыми (менее 10-ти длин волн) с периодом многослойной структуры и длиной волны излучения;
- многослойные отражающие маски с характерными топологиями (линии, круги, углы) и размерами 100, 150, 200 и 350 нм для макета нанолитографа;
- макет нанолитографа, обеспечивающий топологические нормы 30 нм;
- образцы приборных наноструктур с изменяющимся туннельным магнитосопротивлением (ТМС) на уровне 1-10 %;
- пакет прикладных программ по расчету распределений намагниченности в ферромагнитных наночастицах сложной формы и программ моделирующих воздействие внешних однородных и неоднородных полей на намагниченность сложных частиц;
- расчет статических и транспортных характеристик гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик в различных конфигурациях (сверхпроводящая пленка и Джозефсоновский переход с массивом ферромагнитных частиц; ферромагнитный цилиндр, покрытый тонкой сверхпроводящей пленкой и др.) в рамках теории Лондонов и уравнения Узаделя;
- расчет локальной плотности состояний квазичастиц и пространственное распределение сверхпроводящей щели для различных вихревых состояний в мезоскопическом сверхпроводнике (в том числе для вихря, захваченного на протяженном дефекте и вихря вблизи поверхности образца) будет выполнен на основе решения уравнений Боголюбова-де Жена;
- локализационные поправки к проводимости двумерного электронного газа в слабом неоднородном магнитном поле с нулевым пространственным средним используя методы кинетической теории для расчета транспортных характеристик сверхпроводящих наноструктур;
- расчет кондактанса системы нормальный металл–сверхпроводник с р-спариванием в присутствие внешнего магнитного поля, направленного вдоль поверхности сверхпроводника на основе решения уравнений Боголюбова-де Жена;

- определены условия существования центров проскальзывания фазы в сверхпроводящих нанопроволоках при температурах существенно меньших критической температуры сверхпроводящего перехода будут найдены на основе численного анализа уравнения Узалея для функций Грина сверхпроводящих электронов и уравнения Больцмана для функции распределения квазичастиц.

## 2. Программа для расчета транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников с несверхпроводящими дефектами различной формы и исследования динамики вихрей в таких структурах.

Изучение динамики и распределения сверхпроводящего параметра порядка в пленках сложной геометрии (в частности, в пленках с множественными дефектами различной природы) продолжает быть актуальным в связи с активным изучением вихревого состояния в мезоскопических сверхпроводниках, проблемы искусственного пиннинга вихрей, исследованиями нелинейных транспортных и электромагнитных свойств смешанного состояния (см., напр. [76]).

Одним из важных инструментов теоретического исследования задач этого типа является численное моделирование.

В работе представлена новая версия программы моделирования динамики параметра порядка в мезоскопических сверхпроводящих пленках сложной геометрии. В основу модели, как и в предыдущей версии программы [77], положено нестационарное уравнение Гинзбурга-Ландау, имеющее в безразмерных переменных вид

$$i \left( \frac{\partial}{\partial t} + i\varphi \right) \psi = (T_c(\vec{r}) - T) \psi - (1 - T) |\psi|^2 \psi + (\nabla + iA)^2 \psi$$
$$\operatorname{div}(\sigma \nabla \varphi) = \operatorname{div}(j_s)$$
$$j_s = (1 - T) \operatorname{Im}(\psi^* (\nabla + iA) \psi)$$

Здесь  $A$  - вектор-потенциал внешнего магнитного поля,  $\varphi$  - потенциал электрического поля, определяемый из условия равенства нулю дивергенции полного тока в пленке,  $T_c(\vec{r})$ ,  $T$  - критическая температура пленки и температура термостата. Граничные условия имеют вид

$$(\nabla + iA)_n \psi = 0$$
$$\sigma (\nabla \varphi)_n = -j_n$$

Программа представляет собой гибкое модифицируемое Windows-приложение с графическим интерфейсом, позволяющим, в частности, наблюдать за динамикой параметра порядка, тока и движением вихрей в пленке непосредственно в процессе моделирования.

Важным элементом программы является разработанный авторами новый метод и численный алгоритм решения уравнения Пуассона для электрического потенциала, позволяющий вычислять потенциал в областях сложной структуры с эффективностью,



сравнимой с эффективностью Фурье-алгоритма в прямоугольных областях. Идея методов такого рода содержится в [78].

Метод основан на простом матричном тождестве

$$(A + B)^{-1} = A^{-1}(E - (E + BA^{-1})^{-1}BA^{-1}) \quad (2.1)$$

которое позволяет «просто» вычислить матрицу, обратную к возмущенной  $(A+B)$ , если вычислена (или «просто» вычисляется) обратная к исходной  $(A)$ , и размерность области значений матрицы  $B$  мала по сравнению размером матрицы  $A$ .

В случае краевых задач для разностного уравнения Пуассона роль матрицы  $A$  играет разностный оператор Лапласа на прямоугольной сетке в прямоугольной области, содержащей расчетную, и с граничными условиями «удобного» вида (например, периодическими). Роль оператора  $B$  играет разность между этим оператором и разностным оператором Лапласа в расчетной области с заданными граничными условиями. Размерность области значений оператора

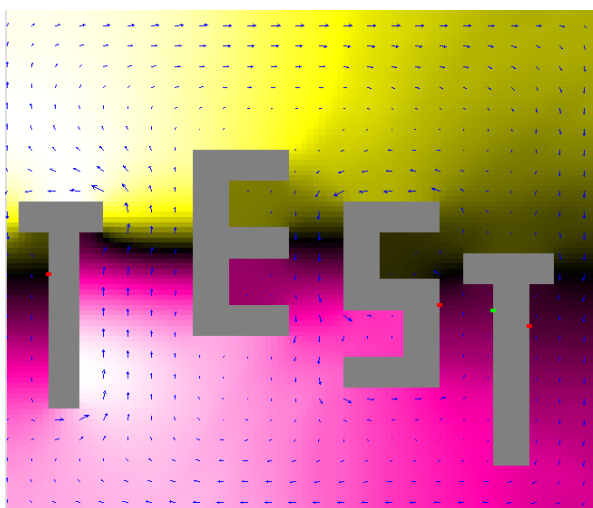


Рисунок 1 - Пример расчета электростатического потенциала в области сложной формы.

$B$  примерно равна числу *граничных* узлов в расчетной области. Численный алгоритм сводится к предварительному вычислению оператора  $(E + BA^{-1})^{-1}$  в пространстве векторов на границе (этот оператор *не зависит* от правой части уравнения), и последующему применению соотношения (2.1). Вычисление матрицы, обратной к  $A$ , выполняется с помощью быстрого преобразования Фурье. Производительность метода оценивается как  $O(M^3 + N \log N)$  для «индивидуальных задач» (в которых требуется однократное вычисление обратного оператора) и как  $O(M^2 + N \log N)$  для серийных задач, таких как рассматриваемая задача моделирования сверхпроводящих пленок. Здесь  $N$  - число узлов

сетки в расчетной области,  $M$  – число граничных узлов сетки. В двумерных задачах обычно  $M \approx O(N^{1/2})$ . На рис. 1 показан пример расчета электростатического потенциала в прямоугольной области с «дырками».

Число узлов сетки 496x496.

Время расчета:

Метод простой итерации: 59.75 сек.

Метод сопряженных градиентов 3.297 сек.

Модифицированный метод Фурье:

однократный: 3.328 сек.

многократный: 0.078 сек.

Разработанная программа позволяет «конструировать» модели пленок сложной геометрии (в частности, с множественными изоляторными дефектами и включениями нормального металла) и исследовать динамику сверхпроводящего параметра порядка в них под действием внешних, возможно, зависящих от времени, электрических и магнитных полей. Для демонстрации возможностей программы были рассмотрены модельные задачи о переходе мезоскопического сверхпроводника квадратной формы из сверхпроводящего состояния в нормальное и резистивное состояния под действием стационарного стороннего тока.

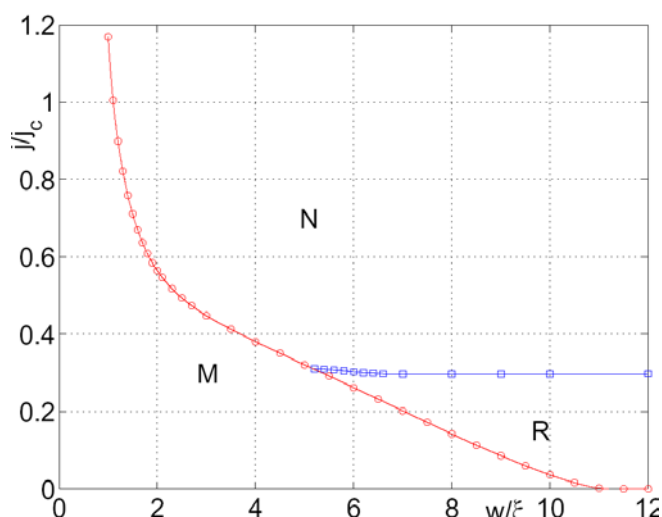


Рисунок 2 - Фазовая диаграмма  $j-w$ , полученная для  $H=0.25H_{c2}$ . В качестве начального состояния было выбрано мейсснеровское (M) состояние с нулевым током, области N и R соответствуют нормальному и резистивному состояниям.

Для сверхпроводящего образца без дефектов в присутствии инжектируемого тока возможны следующие состояния: мейсснеровское (M) состояние, соответствующее бездиссипативному протеканию тока в отсутствие вихрей; нормальное (N) состояние с полностью подавленным параметром порядка; резистивное (R) состояние, соответствующее движению вихрей перпендикулярно стороннему току. Реализация конкретного режима зависит от плотности инжектируемого тока  $j$ , ширины образца  $w$  и величины внешнего магнитного поля  $H$ . Взаимное расположение областей M, R, N на фазовой плоскости  $j$ - $w$ , рассчитанное для  $H=0.25H_{c2}$  представлено на Рис.2. Здесь  $j_c$  – плотность тока распаривания Гинзбурга-Ландау,  $\xi$  – длина когерентности,  $H_{c2}=\Phi_0/(2\pi\xi^2)$  – верхнее критическое поле ( $\Phi_0=\hbar c/e$  – квант магнитного потока). Заметим, что для  $w/\xi>11$  мейсснеровское состояние неустойчиво и вихревые структуры возникают даже в отсутствие транспортного тока.

В мезоскопическом сверхпроводнике квадратной формы с дефектом (сквозным квадратным отверстием размера  $d$ ), расположенным в центре, могут существовать состояния с закрепленными вихрями (захваченным магнитным потоком). В зависимости от размера дефекта и приложенного тока вихри могут срывать с дефекта и сверхпроводник будет переходить в резистивное состояние. На фазовой диаграмме  $j$ - $d$  (Рис.3) представлены состояния с захваченными вихрями (P1 – захвачен один квант потока и P2 - захвачено два кванта потока) и резистивное состояние. При расчётах фиксировалась ширина областей, по которым ток обтекал дефект (по  $3\xi$  с каждой стороны, т.о. ширина всего образца  $w=d+6\xi$ ). Растущий участок фазовой линии  $j(d)$  соответствует депиннигу вихря (уходу его с дефекта), падающий – выталкиванию захваченного вихря вихрём, пришедшим извне.

В дальнейшем данный пакет программ будет использован при выполнении запланированных работ по данному государственному контракту (работы 3.2, 5.4, 5.5, 6.2, 6.3 в соответствие с календарным планом).

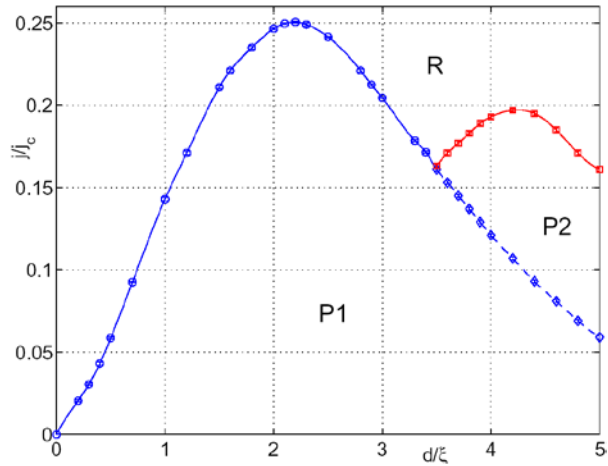


Рисунок. 3 - Фазовая диаграмма  $j$ - $d$ , полученная для внешнего поля  $H=0.25H_{c2}$ . В качестве начального состояния было выбрано состояние с одним захваченным вихрем (P1) в отсутствии тока. Область P2 соответствует состоянию с двумя запиннированными вихрями, область R соответствует резистивному состоянию.

### 3. Модель, описывающая локализационные поправки к проводимости двумерного электронного газа в неоднородном магнитном поле.

В рамках проекта проведен аналитический расчет локализационных поправок к проводимости двумерного электронного газа для широкого класса неоднородных магнитных полей. Особое внимание было уделено расчетам пространственно усредненной поправки к проводимости, которая является экспериментально измеряемой величиной, определяющей вольтамперную характеристику образца. Ожидается, что проведенные теоретические исследования позволят рассчитать оптимальные параметры гибридных структур ферромагнетик/двумерный электронный газ, в которых будет реализовано эффективное управление сопротивлением электронного газа посредством изменения распределения намагниченности в ферромагнитной подсистеме.

Были теоретически описаны основные режимы слабой локализации, реализующиеся при различных параметрах рассматриваемых гибридных систем. Показано, что характер проводимости электронной подсистемы определяется соотношением между тремя основными пространственными масштабами: длиной релаксации фазы электронной волновой функции  $L_\varphi = \sqrt{D\tau_\varphi}$  ( $D$  - коэффициент диффузии электронов,  $\tau_\varphi$  - характерное время релаксации фазы волновой функции электрона, определяемой неупругими процессами рассеяния); характерным масштабом неоднородности магнитного поля  $d$ ;

магнитной длиной релаксации фазы  $L_H = \sqrt{\Phi_0 / H_0}$  ( $H_0$  - амплитудное значение магнитного поля). Основные режимы слабой локализации графически показаны на рисунке 4.

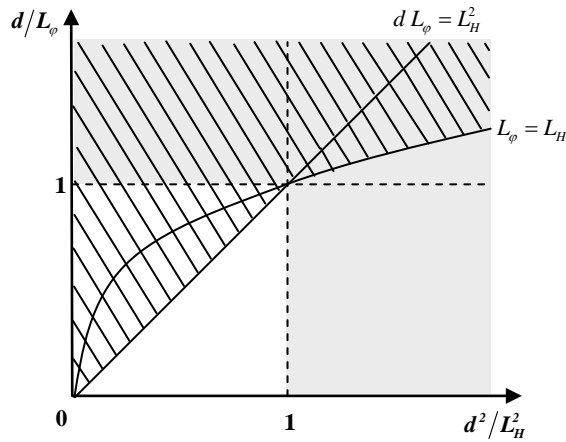


Рисунок 4 - Диаграмма различных режимов слабой локализации на плоскости ключевых параметров гибридной системы.

На рисунке 4 серым цветом показана область параметров, в которой для описания слабой локализации может быть использовано так называемое локальное приближение, в рамках которого проводимость в некоторой точке пространства определяется магнитным полем только в этой точке. В белой области магнитное поле является слабым, однако его неоднородность приводит к эффективной перенормировке характерного времени релаксации фазы, которая может быть описана в рамках приближения, аналогичного приближению слабой связи в теории блоховских электронов. В заштрихованной области магнитное поле слабо влияет на локализационную поправку к проводимости, и последняя может быть рассчитана в рамках теории возмущений по величине поля.

В ходе работ по проекту были произведены расчеты проводимости электронного газа для всех основных режимов слабой локализации, показанных на рисунке 4. Вначале был проанализирован характер проводимости в слабом магнитном поле произвольной пространственной конфигурации. Условием малости магнитного поля является малость его потока через характерную замкнутую электронную траекторию вблизи точки  $\vec{r}$  ( $\vec{r}$  - радиус-вектор в плоскости электронного газа) с характерным размером  $L_\varphi$  по сравнению с квантом потока  $\Phi_0 = \pi \hbar c / e$ :

$$\int_S H_z^2(\vec{r} + \vec{R}) d^2 \vec{R} \ll \Phi_0^2 / L_\varphi^2,$$

где  $H_z$  - компонента магнитного поля, направленная по нормали к двумерному электронному газу,  $S$  - область размера  $\min\{d, L_\varphi\}$  вокруг точки  $\vec{r}$ . В этом случае магнитное поле оказывает слабое влияние на локализационную поправку к проводимости, и уравнение было решено в рамках теории возмущений по величине поля. В результате было получено аналитическое выражение для пространственно усредненной проводимости  $\langle\sigma\rangle$  двумерного электронного газа:

$$\langle\sigma\rangle = \sigma_D - \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \ln \frac{\tau_\varphi}{\tau} + \frac{2e^4 D^2 \tau_\varphi^2}{\hbar^3 c^2 S_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\vec{k} |H_{\vec{k}}|^2 F\left(\frac{k^2 D \tau_\varphi}{4}\right), \quad (3.1)$$

где  $H_{\vec{k}}$  - пространственная Фурье-гармоника магнитного поля:

$$H_{\vec{k}} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_z(\vec{r}) e^{-i\vec{k}\vec{r}} d^2\vec{r},$$

$$F(\xi) = \frac{1}{\xi} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\xi(\xi+1)}} \ln(\sqrt{\xi+1} + \sqrt{\xi}) \right).$$

При увеличении  $\xi$  от нуля до бесконечности функция  $F(\xi)$  монотонно убывает от значения  $2/3$  до нуля (при  $\xi \rightarrow 0$   $F(\xi) \approx 2/3 - \xi$ , при  $\xi \rightarrow \infty$   $F(\xi) \approx 1/\xi$ ). Таким образом, был сделан вывод о том, что вклады разных пространственных гармоник магнитного поля в усредненную поправку к проводимости аддитивны, причем наибольшее влияние на поправку к проводимости оказывают гармоники с малыми.

Выражение (3.1) принимает наиболее простую форму в случае магнитного поля, имеющего узкий пространственный спектр. Если величина  $H_{\vec{k}}$  отлична от нуля только в области  $|\vec{k}| \ll L_\varphi^{-1}$ , пространственно усредненное значение проводимости  $\langle\sigma\rangle$  определяется выражением

$$\langle\sigma\rangle = \sigma_D - \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \ln \frac{\tau_\varphi}{\tau} + \frac{e^4 D^2 \tau_\varphi^2}{3\pi^2 \hbar^3 c^2 S_0} \int_{S_0} H_z^2(\vec{r}) d^2\vec{r},$$

где  $S_0$  - площадь образца. В случае слабо неоднородного магнитного поля с масштабом неоднородности больше  $L_\varphi$  усредненная проводимости определяется только пространственным средним от квадрата магнитного поля. Таким образом, локализационная поправка к проводимости чувствительна не только к среднему значению магнитного поля, но и к его статистическим моментам.

Также в ходе работы было исследовано влияние слабого пространственно периодического магнитного поля с нулевым средним на характерное время дефазировки

электронов при низких температурах, таких что  $L_\varphi > d$  ( $d$  - характерный масштаб неоднородности поля). Для расчета характерного времени дефазировки было показано, что усредненная проводимость электронного газа  $\langle \sigma \rangle$  определяется следующим выражением:

$$\langle \Delta \sigma \rangle = -\frac{2e^2}{\pi \hbar S_0} \sum_{\alpha} \frac{1}{\varepsilon_{\alpha} D + \frac{1}{\tau_{\varphi}}} e^{-\left(\varepsilon_{\alpha} D + \frac{1}{\tau_{\varphi}}\right) \tau}.$$

Здесь  $S_0$  - площадь образца,  $\varepsilon_{\alpha}$  и  $\psi_{\alpha}(\vec{r})$  - собственные значения и нормированные собственные функции гамильтониана  $\hat{H}(\vec{r})$ :

$$\hat{H}(\vec{r}) = \left( -i \frac{\partial}{\partial \vec{r}} - \frac{2e}{\hbar c} \vec{A}(\vec{r}) \right)^2,$$

$$\hat{H}(\vec{r}) \psi_{\alpha}(\vec{r}) = \varepsilon_{\alpha} \psi_{\alpha}(\vec{r}),$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{\alpha}(\vec{r}) \psi_{\alpha'}^*(\vec{r}) d^2 \vec{r} = \delta_{\alpha \alpha'},$$

под  $\alpha$  понимается полный набор квантовых чисел.

Для расчета спектра оператора  $\hat{H}(\vec{r})$  было использовано условие пространственной периодичности магнитного поля. При этом поправка к проводимости определяется пространственными Фурье-компонентами магнитного поля  $H_z(\vec{r})$ , которое может быть представлено в виде:

$$H_z(\vec{r}) = H + \sum_{\vec{b}_n \neq 0} H_n e^{i \vec{b}_n \vec{r}},$$

где  $\vec{b}_n$  - вектора обратной решетки, построенные по основным векторам трансляции в плоскости электронного газа. Вначале был рассмотрен случай магнитного поля с нулевым пространственным средним ( $H = 0$ ). В этом случае трансляционная симметрия гамильтониана  $\hat{H}(\vec{r})$  позволяет доказать теорему, аналогичную теореме Блоха для электрона в периодическом потенциале. При этом спектр оператора  $\hat{H}(\vec{r})$  будет определяться квантовым числом  $\vec{k}$  - аналогом квазиимпульса. Данный спектр был рассчитан для магнитных полей с малой амплитудой ( $H_0 \ll \Phi_0 / d^2$ ,  $H_0$  - амплитудное значение магнитного поля) в рамках метода, аналогичному методу слабой связи в теории блоховских электронов. Выражение для спектра имеет вид

$$\varepsilon(\vec{k}) = \vec{k}^2 - \frac{16e^2}{\hbar^2 c^2} \sum_{\vec{b}_n \neq 0} \frac{|H_n|^2 \left( \vec{k}, [\vec{b}_n \times \vec{z}_0] \right)^2}{\vec{b}_n^6} + \frac{4e^2}{\hbar^2 c^2} \sum_{\vec{b}_n \neq 0} \frac{|H_n|^2}{\vec{b}_n^2}. \quad (3.2)$$

и справедливо вдали от границы «зоны Бриллюэна» в обратном пространстве, то есть при малых  $|\vec{k}|$  ( $|\vec{k}| \ll |\vec{b}_n|$ ). Второе слагаемое в спектре (3.2) приводит к перенормировке «эффективной массы» в квадратичном по  $|\vec{k}|$  слагаемом и не оказывает существенное влияние на характерное время релаксации фазы волновой функции электрона, тогда как последнее слагаемое не зависит от  $\vec{k}$  и определяет конечное время дефазировки электрона, обусловленное периодическим магнитным полем. Полное время дефазировки электрона  $\tilde{\tau}_H$ , обусловленное как неупругими процессами рассеяния, так и периодическим магнитным полем может быть определено следующим образом:

$$\frac{1}{\tilde{\tau}_H} = \frac{1}{\tau_\varphi} + \frac{4e^2 D}{\hbar^2 c^2} \sum_{\vec{b}_n \neq 0} \frac{|H_n|^2}{\vec{b}_n^2}.$$

При этом выражение для пространственно усредненной проводимости электронного газа имеет вид

$$\langle \sigma \rangle \approx \sigma_D + \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \ln \left[ \frac{\tau}{\tau_\varphi} + \frac{4e^2 D \tau}{\hbar^2 c^2} \sum_{\vec{b}_n \neq 0} \frac{|H_n|^2}{\vec{b}_n^2} \right].$$

В полученном выражении зависимость от магнитного поля сохранена только в аргументе логарифма, поскольку именно логарифмическое слагаемое в поправке к проводимости является доминирующим.

В пределе нулевой температуры величина времени релаксации фазы  $\tilde{\tau}_H^{-1}$  пропорциональна квадрату амплитуды магнитного поля, в отличие от случая однородного поля, где соответствующая величина пропорциональна первой степени поля ( $t_H^{-1} \sim H$ ).

В случае же магнитного поля с отличным от нуля пространственным средним ( $H \neq 0$ , но  $HS_{uc} \ll \Phi_0$ ,  $S_{uc}$  - площадь элементарной ячейки для магнитного поля) было показано, что усредненная проводимость определяется следующим выражением:

$$\langle \sigma \rangle \approx \sigma_D + \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \ln \left[ \frac{\tau}{\tau_\varphi} + \frac{4e^2 D \tau}{\hbar^2 c^2} \sum_{\vec{b}_n \neq 0} \frac{|H_n|^2}{\vec{b}_n^2} \right] + \frac{e^2}{3\pi^2 \hbar} \left( \frac{eHD\tau_\varphi}{\hbar c} \right)^2.$$

Таким образом, ненулевое среднее значение магнитного поля приводит к возникновению малой аддитивной поправки к проводимости.

Далее было проанализировано влияние сильных магнитных полей (таких, что амплитудное значение поля удовлетворяет условию  $H_0 \gg \Phi_0/d^2$ ) на локализационную



поправку к проводимости. Было показано, что при выполнении указанного условия поправка к проводимости может быть рассчитана в рамках так называемого локального приближения, то есть проводимость в некоторой точке пространства определяется магнитным полем только в этой точке. При этом уравнение для функции Грина может быть записано в следующем виде:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t_f} + D \left( -i \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{A}_{loc}(\vec{R}, \vec{r}) - \frac{2e}{\hbar c} \vec{A}_{loc}(\vec{R}, \vec{r}) \right)^2 + \frac{1}{\tau_\varphi} \right] G(\vec{r}, \vec{r}', t_f - t_i) = \delta(\vec{r} - \vec{r}') \delta(t_f - t_i).$$

Здесь  $\vec{R} = (\vec{r}_f + \vec{r}_i) / 2$ ,  $\vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i$ ,  $\tilde{C} = C \exp[-(2ie/\hbar c)(\vec{A}(\vec{R}), \vec{r})]$ ,  $\vec{A}_{loc}(\vec{R}, \vec{r}) = 1/2 [\vec{H}_{loc}(\vec{R}), \vec{r}]$ ,  $\vec{H}_{loc}(\vec{R}) = \text{ro}_{\vec{R}} \vec{A}(\vec{R})$ .

Кроме того, в ходе работ по проекту для гибридных систем, содержащих двумерный электронный газ и магнитную подсистему, создающую пространственно периодическое магнитное поле с нулевым средним, было предсказано существование эффекта положительного магнитосопротивления электронной подсистемы во внешнем однородном магнитном поле. Данный эффект проявляется в существенной немонотонности зависимостей пространственно усредненной проводимости от величины внешнего однородного магнитного поля, которые имеют резкие провалы, соответствующие равенству напряженности внешнего однородного поля амплитудному значению поля магнитной подсистемы. Очевидной причиной возникновения немонотонных зависимостей является эффект частичной компенсации магнитного поля в пространственных областях, в которых среднее поле и поле магнитной подсистемы противоположно направлены. Показано, что данный эффект сильно зависит от пространственной конфигурации магнитного поля, создаваемого магнитной подсистемой. Для двух модельных конфигураций периодического магнитного поля в рамках локального приближения получены условия существования положительного магнитосопротивления. Полученные результаты были опубликованы в [79].

#### **4. Программа для моделирования равновесных магнитных состояний в многослойных частицах, содержащих несколько слоев ферромагнетика, разделенных немагнитной прослойкой.**

Вычислительный эксперимент является полезным и важным инструментом исследования широкого класса микромагнитных явлений. Среди них динамика и стационарные распределения намагниченности магнитных как одно- так и многослойных наночастиц различной формы, взаимодействие частиц, влияние внешнего магнитного поля, в том числе переменного, неоднородного и случайного (моделирующего тепловые флуктуации), моделирование магнито-силового изображения частицы и многие другие. При разработке программного обеспечения для решения таких задач важно иметь возможность легко менять конфигурацию магнитной системы, учитывать разные типы внешнего воздействия, что приводит к необходимости модифицировать программу, добавляя в нее новые функциональные возможности.

В лаборатории математического моделирования ИФМ РАН разработан пакет программ SIMMAG (SIMulation of MicroMAGnets) [80], который позволяет решать многие из перечисленных задач. Пакет основан на численном решении уравнения Ландау-Лившица-Гильберта (ЛЛГ), описывающего динамику намагниченности в частице. Эффективное магнитное поле, входящее в это уравнение, может включать в себя поле магнитостатического взаимодействия, поле обмена, поле анизотропии и внешнее магнитное поле, которое может быть как неоднородным по пространству и/или переменным по времени, так и тепловым.

Пакет реализован на языке программирования C++ для операционной системы Windows. При разработке пакета последовательно применялся объектно-ориентированный подход, суть которого заключается в том, что вся программа разбивается на отдельные части – объекты. Поведение каждого объекта определяется своим набором функций – интерфейсом (на языке C++ реализуется как абстрактный базовый класс). Через эти интерфейсы объекты взаимодействуют друг с другом.

Каждый интерфейс может иметь несколько реализаций. На языке C++ реализация интерфейса представляет собой производный класс и обеспечивает конкретное поведение данного объекта. Так, например, интерфейс внешнего магнитного поля включает в себя, в частности, функцию вычисления внешнего магнитного поля в заданных точках пространства. Конкретная реализация этой функции может задавать постоянное магнитное поле, или поле, создаваемое точечным диполем, или периодическое по времени поле и т.д.

Каждый модуль, реализующий тот или иной интерфейс, размещается в отдельной динамически подключаемой библиотеке (dll) и не зависит от других модулей. После запуска программы пользователь имеет возможность выбрать набор модулей, необходимых для решения конкретной задачи. Добавление нового модуля заключается в разработке и отладке отдельного проекта (отдельной dll). При этом остальные части программы не изменяются и не требуют перекомпиляции.

Следует отметить, что в рамках пакета SIMMAG разработка программы для решения конкретной задачи сводится к проектированию и отладке сравнительно небольшого отдельного модуля и не затрагивает основную часть программы. Следовательно, использование пакета не только существенно сокращает время разработки конкретной программы, но и увеличивает ее надежность, поскольку позволяет многократно использовать уже готовые модули.

Чтобы дать представление о возможностях пакета SIMMAG, перечислим некоторые задачи, которые были решены с его помощью.

- 1) Моделирование процесса перемагничивания цепочки классических диполей внешним полем при конечной температуре [81]. Были получены зависимости среднего времени перемагничивания от магнитного поля и температуры.
- 2) Моделирование взаимодействия двух магнитных наночастиц, расположенные в плоскости (x,y) [82]. Было показано, что при определенном направлении внешнего магнитного поля имеет место гистерезис из-за появления вихревого распределения намагниченности в частицах.
- 3) Моделирование процесса перемагничивания внешним магнитным полем ферромагнитного диска, помещенного над сверхпроводником [83,84]. Проведенные расчеты показали, что в зависимости от расстояния между частицей и сверхпроводником основное состояние менялось незначительно. Однако, внешнее магнитное поле, при котором вихревое состояние намагниченности переходило в квазиоднородное, изменялось на 100-200 Э, что в принципе доступно экспериментальному наблюдению.
- 4) Влияние зонда магнито-силового микроскопа (МСМ) на распределение намагниченности внутри частицы [85]. Численное моделирование позволило сделать вывод, что экспериментальный эффект асимметрии темных и светлых полюсов МСМ изображений является следствием влияния зонда на намагниченность частицы.
- 5) Моделирование магнитных состояний в двух и трехслойных частицах, состоящих из тонких однодоменных слоев ферромагнетика, разделенных немагнитными прослойками [86]. Показано, что в двухслойных частицах стационарным распределением намагниченности является антиферромагнитное состояние, а в трехслойных частицах, по

форме близких к круговому цилиндру, возможно неколлинеарное распределение намагниченности. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими оценками. Построенные МСМ изображения таких частиц (см., напр., Рис. 5, 6) помогли интерпретировать экспериментально наблюдаемые изображения.

В дальнейшем данный пакет программ будет использован при выполнении запланированных работ по данному государственному контракту (работы 2.1, 2.2 в соответствии с календарным планом).

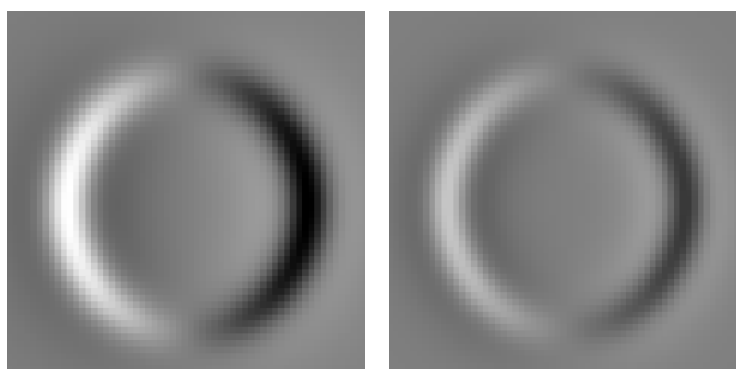


Рисунок 5 - МСМ изображение двухслойной частицы Co при ферромагнитном (слева) и антиферромагнитном (справа) распределении намагниченности в слоях (диаметр 200нм, толщина слоя 15 нм, расстояние между слоями 5 нм).

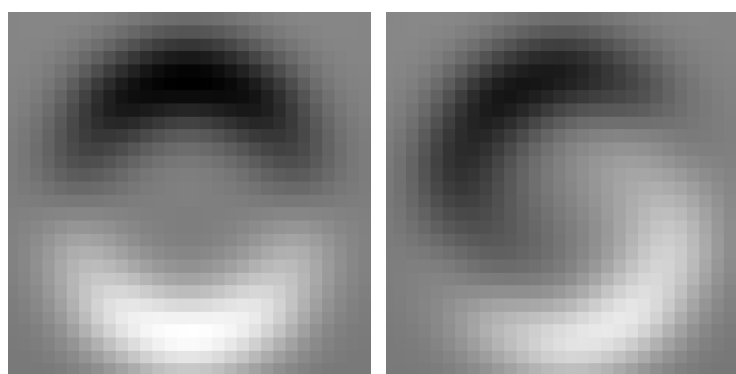


Рисунок 6 - МСМ изображение трехслойной частицы Co при антиферромагнитном (слева) и неколлинеарном (справа) распределении намагниченности в слоях (диаметр 40нм, толщина слоев 10, 6 и 6 нм, расстояние между слоями 1 нм).

## 5. Теоретическая модель, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности.

Построена феноменологическая теория, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности. Данная теория показывает, что в средах с некомпланарной неоднородной магнитной структурой возможен ряд новых по сравнению с компланарными средами эффектов. В частности, «топологический» эффект Холла [87], эффект выпрямления электрического тока [88], а также явление оптической активности [89] в таких средах могут быть качественно описаны в рамках предложенной теории. Для возникновения «топологического» эффекта Холла необходимо, чтобы намагниченность в системе изменялась как минимум по двум координатам. Примерами таких систем являются микрочастицы с вихревым и антивихревым распределением намагниченности [87]. Эффект выпрямления электрического тока и оптическая активность возникают в средах, магнитная структура которых не обладает центром инверсии и изменяется как минимум по одной координате. Примером такого распределения намагниченности является конусная спираль, реализующаяся в редкоземельных металлах Ho, Er, Dy [90], в ряде соединений (MnSi, FeGe) [91], а также в ферромагнитных наноструктурах [92].

Рассмотрим среду с распределением намагниченности  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ . Основное предположение относительно исследуемой среды состоит в том, что обменное взаимодействие является в ней доминирующим и всеми релятивистскими взаимодействиями можно пренебречь. Поскольку намагниченность вращается в среде медленно, проводимость можно представить в виде суммы проводимости однородной среды и поправок, связанных с неоднородностью, и зависящих, соответственно, от пространственных производных намагниченности. Пусть амплитуда намагниченности одинакова во всех точках пространства, и  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  может только поворачиваться при переходе из одной точки в другую. При этом намагниченность вращается в пространстве медленно, т.е. поворот на угол порядка  $\pi$  происходит на расстояниях, существенно больших, чем постоянная решетки и длина свободного пробега электрона. Из последнего следует, что при построении тензора проводимости можно ограничиться низшими пространственными производными  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ . Таким образом, плотность тока в среде, помещенной во внешнее электрическое поле  $\mathbf{E}$ , имеет вид

$$\mathbf{j} = \sigma_0 (\mathbf{E}, / \mathbf{M}) \mathbf{E} + \sigma_M \left( \mathbf{M}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{M}, \dots, \mathbf{E} \right) \mathbf{E} + \sigma_{ME} \left( \mathbf{M}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{M}, \dots \right) \nabla \mathbf{E}. \quad (5.1)$$

Первое слагаемое описывает проводимость однородной среды и содержит только модуль намагниченности. Второе и третье слагаемые, по нашему предположению, связаны с неоднородностью  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  и должны зависеть от производных намагниченности по координатам. Третье слагаемое зависит также от производной по электрическому полю и описывает пространственную дисперсию. Во втором слагаемом формулы (5.1) учтена возможность существования нелинейных по электрическому полю эффектов. На тензоры проводимости  $\sigma_M$  и  $\sigma_{ME}$  накладывается два ограничения. Первое связано с тем, что при инверсии пространства знак тока должен меняться на противоположный. Второе ограничение следует из того, что рассматриваемая система обладает обменной симметрией. Это означает, что при повороте всех магнитных моментов в системе на один и тот же угол гамильтониан системы и, соответственно, любые физические величины (кроме направления вектора намагниченности) не должны меняться. Таким образом, тензоры  $\sigma_M$  и  $\sigma_{ME}$  должны быть инвариантны относительно вращения намагниченности. Это означает, что магнитные и координатные индексы не должны сворачиваться друг с другом.

Из второго ограничения следует, что линейных по намагниченности эффектов в такой среде быть не может. Тензор же проводимости, содержащий два вектора намагниченности, не меняет знака при обращении времени, в то время как направление тока при обращении времени меняется на противоположное. Это означает, что описываемый таким тензором вклад в проводимость может существовать только в средах, где есть диссипация. Далее мы ограничимся рассмотрением бездиссипативных сред.

Тензор  $\sigma_M$ , содержащий три вектора намагниченности, должен содержать также две пространственных производных. Единственный такой тензор, удовлетворяющий всем свойствам симметрии, в изотропном веществе имеет вид

$$\sigma_{ij}^H = K_H \left( \mathbf{M}, \left[ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_i}, \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_j} \right] \right) \quad (5.2)$$

Из свойств векторного произведения следует, что этот тензор является антисимметричным. Таким образом, он описывает эффект типа эффекта Холла. Его называют «топологическим» эффектом Холла. Как видно из формулы (5.2), тензор, описывающий «топологический» эффект Холла, отличен от нуля лишь в средах, в которых намагниченность зависит от двух координат. Примерами таких сред являются микрочастицы с вихревым и антивихревым распределением намагниченности [87].

Кроме топологического эффекта Холла в некомпланарных магнитных системах может также существовать линейный эффект другого рода. Если электрическое поле

неоднородно в пространстве, то возможна добавка к проводимости, пропорциональная линейной пространственной производной по электрическому полю. В оптике данный эффект называется оптической активностью. Используя те же правила, по которым был построен два предыдущий тензор, можно написать тензор, описывающий данный эффект в виде

$$\hat{\sigma}_{ij}^{OA} = \hat{\alpha}_{ijklmn}^{OA} \left( \mathbf{M}, \left[ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_l}, \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial x_m \partial x_n} \right] \right) \frac{\partial}{\partial x_k}$$

В изотропной среде тензор шестого ранга  $\hat{\alpha}^{OA}$  может быть сведен к следующему выражению

$$\hat{\alpha}_{ijklmn}^{OA} = K_1^{OA} \delta_{il} \delta_{jm} \delta_{kn} + K_2^{OA} \delta_{ij} \delta_{kl} \delta_{mn} + \dots + K_8^{OA} \delta_{jk} \delta_{il} \delta_{mn} + K_9^{OA} e_{ijk} e_{lmn} + \dots + K_{12}^{OA} e_{imk} e_{ljn}. \quad (5.3)$$

Здесь  $e_{ijk}$  — полностью антисимметричный тензор 3-го ранга (тензор Леви-Чивита).

Выше были рассмотрены линейные по электрическому полю эффекты, возникающие в среде с неоднородным распределением намагниченности. Покажем теперь, что в среде с некомпланарной магнитной структурой может существовать квадратичный по полю эффект. Тензор квадратичной проводимости должен быть тензором третьего ранга. Также он должен менять знак при инверсии пространства, поскольку ток при этой операции меняет знак, а квадрат электрического поля — нет. Эти требования приводят к тензору вида

$$\hat{\sigma}_{ijk}^Q = \hat{\alpha}_{ijklmn}^Q \left( \mathbf{M}, \left[ \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial x_l}, \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial x_m \partial x_n} \right] \right).$$

Тензор  $\hat{\alpha}^Q$  в изотропной среде описывается формулой, аналогичной формуле (5.3) для тензора  $\hat{\alpha}^{OA}$ .

Таким образом, в данной работе на основе общих соображений симметрии получены особенности проводимости сред, обладающих неоднородным распределением намагниченности. В частности, построена феноменологическая теория, описывающая такие линейные эффекты, как «топологический» эффект Холла, оптическую активность, а также нелинейное явление выпрямления электрического тока в данных средах.

## **6. Рентгенооптическая схема EUV нанолитографа на основе асферического двухзеркального объектива Шварцшильда.**

В рамках данного контракта и при участии в финансировании проекта РосАтома по развитию элементной базы микроэлектроники нового поколения была разработана рентгенооптическая схема нанолитографа-мультипликатора с рабочей длиной волны 13,5 нм и расчетным разрешением 30 нм (размер минимального рисунка топологии микросхемы). Актуальность этой задачи связана, как с современными тенденциями развития микроэлектроники, переход на технологические нормы 32-22 нм, так и рядом ограничений на экспорт высоких технологий и оборудования в Россию.

Оптическая схема литографа приведена на рис. 7. Его работа происходит следующим образом. Электронный пучок с помощью магнитостатической линзы фокусируется на кремниевую мишень, представляющую собой тонкую пластину из высокопроводящего кремния, припаянную к водоохлаждаемому держателю. Флуоресцентное излучение в области L-линии кремния ( $\lambda \approx 13,5$  нм) собирается в телесном угле  $\approx 1$  страд коллектором, который представляет собой сферическое зеркало с отражающим Mo/Si покрытием. Отраженное от зеркала-коллектора излучение падает на зеркало-осветитель, состоящее из 25-ти мини-зеркал с отражающими Mo/Si покрытиями, которое формирует на маске излучение с равномерным распределением интенсивности размером  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. О свойствах и способе изготовления зеркала-осветителя подробно описано в [93].

Маска представляет собой многослойное Mo/Si зеркало, покрытое поглощающим ЭУФ излучение слоем, в котором методами электронной литографии и плазмо-химического травления вскрыты окна с требуемым рисунком. Уменьшенное изображение рисунка на маске с помощью проекционного объектива формируется на пластине с фоторезистом.

После облучения части пластины с фоторезистом необходимой дозой излучения (для массового производства планируется 5-10 мДж/см<sup>2</sup>) пластина с фоторезистом и, при необходимости, маска, с помощью 2D-столов могут переместиться, и процесс засветки может быть повторен.



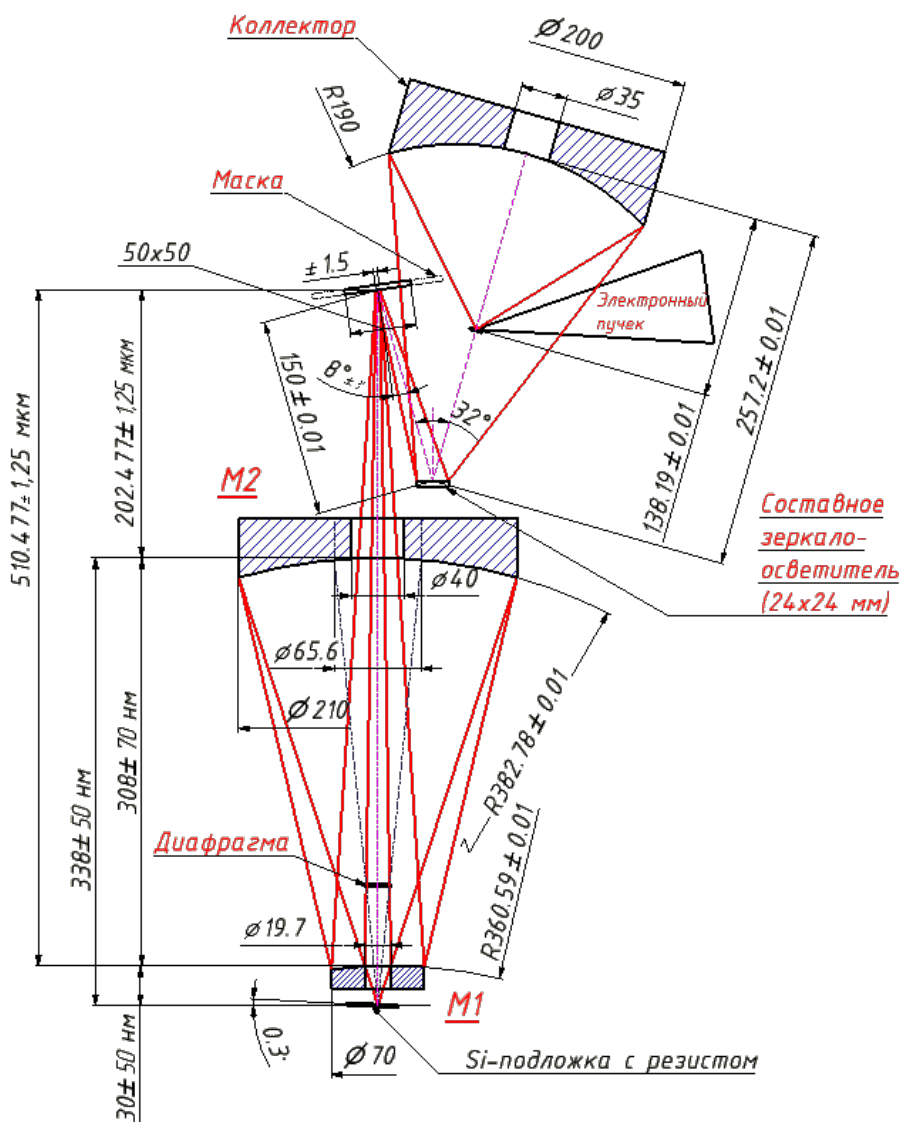


Рисунок 7 - Оптическая схема нанолитографа.

Ключевым элементом, обеспечивающим пространственное разрешение прибора, является проекционный объектив, переносящий изображение маски на пластину с фоторезистом с пятикратным уменьшением.

В соответствии с критерием Рэля пространственное разрешение объектива определяется:

$$\delta x = k_1 \cdot \lambda / NA, \quad NA = n \cdot \sin \alpha$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от способа освещения и когерентных свойств света и близкий к 1.  $\lambda$  – длина волны света и  $NA$  – числовая апертура,  $n$  – показатель преломления среды и  $\alpha$  – половина апертурного угла объектива на выходе. Для литографии экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов среда – вакуум, соответственно  $n=1$ .

Из формулы следует, что для достижения разрешения на уровне 30 нм на длине волны 13,5 нм числовая апертура объектива должна быть не менее  $NA=0,27$ . В нашем случае для достижения более высокого контраста изображений числовая апертура объектива была взята  $NA=0,3$ .

Простейшим зеркальным объективом является двухзеркальная схема Шварцшильда, образованная выпуклым и вогнутым сферическими зеркалами (рис.8). При правильном выборе радиусов зеркал и расстояний между элементами схемы удастся скомпенсировать aberrации вплоть до пятого порядка при высоких числовых апертурах объектива (т.е сферическая aberrация и кома третьего порядка равны нулю) [94]. Такая схема широко применяется в рентгеновской микроскопии, однако обладает малым полем зрения, что отрицательно сказывается на ее эффективности для целей проекционной литографии. По аналогии с [95] для расширения поля зрения объектива Шварцшильда мы применили асферические зеркала (рис.8). Расчеты параметров оптической схемы и коэффициентов асферичности зеркал, представленной в виде (2), были выполнены с помощью программы ZEMAX. В таблице 1 приведены результаты расчета для объектива с числовой апертурой  $NA=0,3$  и асферичности до 6-ого порядка.

$$Z = \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2r^2}} + \alpha_1 r^4 + \alpha_2 r^6 + \alpha_3 r^8,$$

где  $C$  – кривизна ( $1/R$ ) поверхности при вершине;  $r$  – расстояние от оптической оси в полярной системе координат;  $k$  – коническая константа;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коэффициенты асферичности.

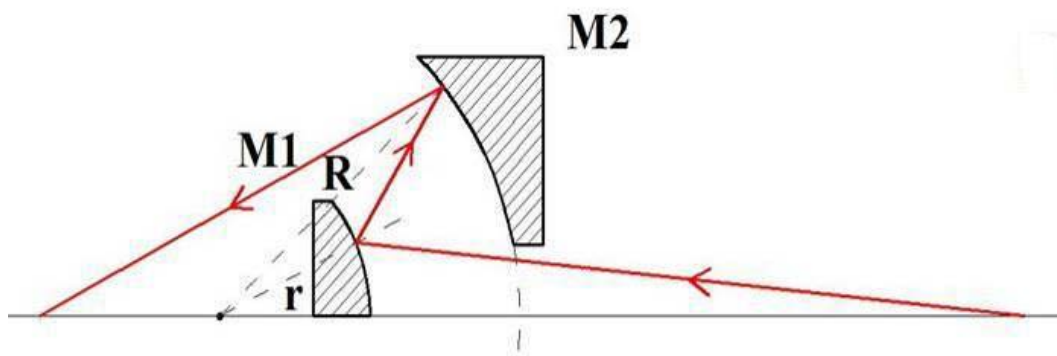


Рисунок 8 - Схема Шварцшильда, образованная выпуклым (M1) и вогнутым (M2) сферическими зеркалами.

**Таблица 1** - Расчет параметров оптической схемы и их допустимых отклонений от номинальных значений для объектива с  $NA=0,3$  и асферичности до 6-ого порядка.

Параметр схемы		Номинальное значение
Расстояние от M1 до M2		307.7803 мм ± <b>50 нм</b>
Расстояние от маски до M1		510.4775 мм ± <b>1250 нм</b>
Расстояние от M2 до резиста		338.1288 мм ± <b>80 нм</b>
Смещение M1 и M2 перпенд. оси		0 ± <b>550 нм</b>
Выпуклое (M1)	$\alpha_1$	1,467024E-8
	$\alpha_2$	6,065241E-13
Вогнутое (M2)	$\alpha_1$	-4,288599E-8
	$\alpha_2$	-9,98299E-17
Деформация волнового фронта		$\lambda/31.7$
Поле зрения на маске		3×3 мм <sup>2</sup> .
Глубина фокуса		160 нм

\*Жирным шрифтом обозначены допустимые отклонения параметров оптической схемы от номинальных.

Качество изображения во многом определяется aberrациями объектива. На рис. 9 приведены расчетные изображения полос шириной 30 нм (вверху) и распределение интенсивности света в плоскости изображения (внизу), обеспечиваемые объективом с числовой апертурой  $NA=0,3$  на длине волны 13,5 нм.. Вверху в углах приведены значение aberrации объектива, выраженные в длинах волн. Как видно из рисунка контраст изображения практически перестает зависеть от aberrаций при их значении меньше  $\lambda/14$ . Для длины волны 13,5 нм это соответствует субнанометровому уровню.

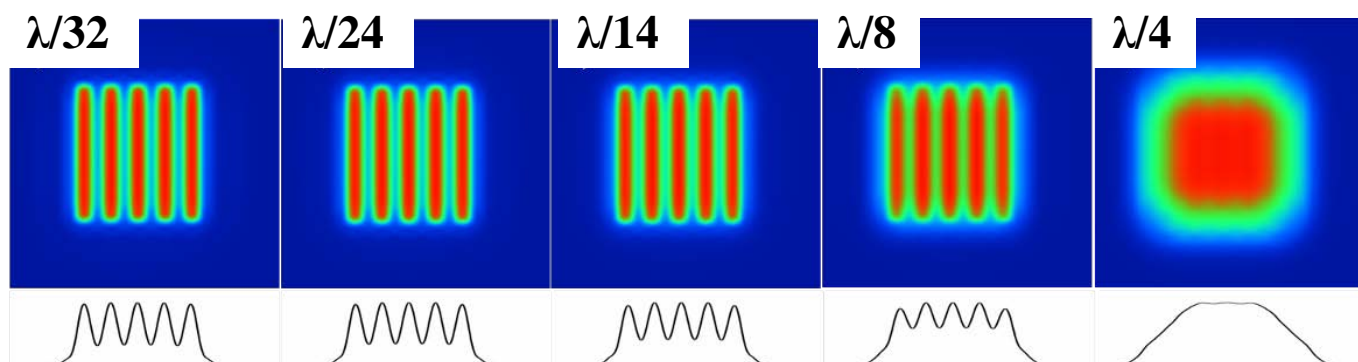


Рисунок 9 - Расчетное изображение полос шириной 30 нм (вверху) и распределение интенсивности света в плоскости изображения (внизу), обеспечиваемые объективом с числовой апертурой  $NA=0,3$ . Вверху в углах приведены значение aberrации объектива, выраженные в длинах волн.

Допустимые отклонения параметров от номинальных значений определялись следующим образом. Для каждого параметра рассчитывалась зависимость среднеквадратической волновой aberrации (RMS) от отстройки от номинального значения при сохранении остальных параметров неизменными. Достижение aberrации  $RMS = \lambda/14$  (критерий Марешаля) соответствовало предельному значению параметра. На рис. 10 приведен пример применения такой процедуры для расстояния между зеркалами M1 и M2. Из рисунка видно, что допустимая расстройка расстояния между зеркалами M1 и M2 составляет  $\pm 50$  нм или в относительных единицах  $\pm 1.62 \times 10^{-7}$ .

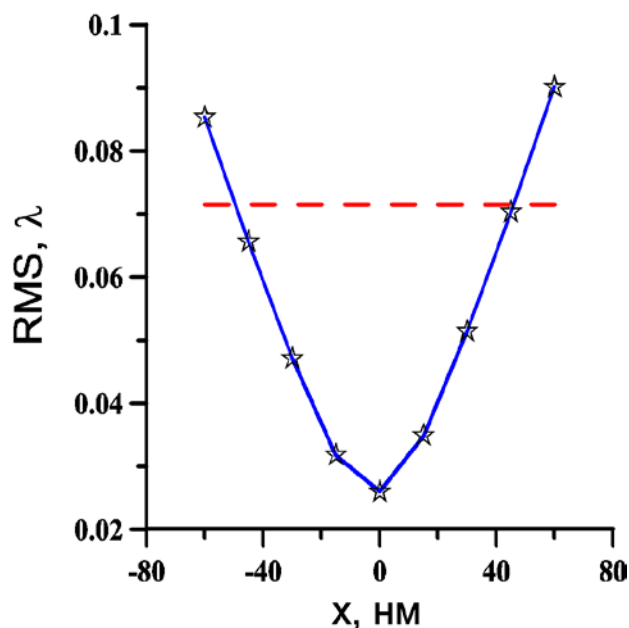


Рисунок 10 - Зависимость RMS от x. x – отклонение от номинального значения расстояния между зеркалами M1 и M2.

Допустимое отклонение расстояния между зеркалом M2 и пластиной с фоторезистом  $\pm 80$  нм накладывает жесткие ограничения не только на систему контроля положения элементов, но и на толщину фоторезиста, которая должна быть не более 160 нм. В противном случае изображение в фоторезисте «расплывется» и разрешение будет потеряно.

Одной из важнейших характеристик оптической системы является модуляционная передаточная функция (МПФ) или контраст изображения:

$$МПФ = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – интенсивности в максимуме и минимуме, соответственно. Общеизвестно, что для того, чтобы элементы маски были разрешены на резисте, МПФ должна быть больше 0.5.

В таблице 2 приведены значения МПФ для полос шириной 10, 16, 22 и 32 нм, рассчитанные для объектива с  $NA=0,3$  и  $NA=0,4$ . Как видно из таблицы, разрешение примерно 27 нм является предельным для объектива с числовой апертурой  $NA=0,3$ .

**Таблица 2** - Расчет МПФ для объективов с  $NA=0,3$  и  $NA=0,4$

$NA$	Ширина полос, нм	МПФ
0,3	10	0
	16	0,29
	22	0,47
	32	0,54
0,4	10	0,15
	16	0,46
	22	0,56
	32	0,66

Для проекционной нанолитографии следующего поколения с разрешением 22-16 нм был рассчитан объектив с числовой апертурой  $NA=0,4$ . Предполагается, что в перспективе разрабатываемый нанолитограф с числовой апертурой  $NA=0,3$  будет оснащен этим объективом. Поэтому, при разработке объектива все расстояния между элементами оставались неизменными, а изменялись только диаметры и асферичность зеркал. В таблице 3 приведены результаты расчета объектива. Оптимизация оптической схемы проводилась при неизменных степенях полиномов, задающих асферичность, и для осевой точки схемы.

**Таблица 3** - Расчет параметров оптической схемы для объективов с  $NA=0,4$  и асферичностью, заданной полиномами 6 и 8 степени

Порядок асферики	Параметр зеркала		Значение
6	Выпуклое (M1)	$\alpha_1$	7,822316E-9
		$\alpha_2$	1,639461E-12
	Вогнутое (M2)	$\alpha_1$	-1,002124E-10
		$\alpha_2$	5,881698E-16
	Световой диаметр M1, мм		87,47
	Световой диаметр M2, мм		290,47
	Деформация волнового фронта		$\lambda/14,4$
8	Выпуклое (M1)	$\alpha_1$	1,481041E-8

		$\alpha_2$	4,781318E-13
		$\alpha_3$	4,337162E-17
	Вогнутое (M2)	$\alpha_1$	-4,192680E-11
		$\alpha_2$	-1,567531E-16
		$\alpha_3$	1,068129E-21
	Световой диаметр M1, мм		87,47
	Световой диаметр M2, мм		290,47
	Деформация волнового фронта		$\lambda/14,4$

Из таблицы 2 видно, что для полос шириной 22 нм,  $MПФ$  объектива равна 0,56, что удовлетворяет литографическим приложениям. Предельное разрешение по критерию  $MПФ=0,5$  для данного объектива составляет примерно 19 нм.

Производительность литографической установки зависит от поля зрения объектива. То есть, чем больше поле зрения, тем большую область мы можем засветить на подложке. Для случая  $NA=0,4$  поле зрения составило  $2 \text{ мм}^2$ , что в 1,5 раза меньше, чем случай меньшей апертуры, однако вполне достаточно для практических приложений.

Проведенные расчеты и анализ схемы объектива с числовой апертурой  $NA=0,3$  легли в основу при разработке и изготовлении объектива.

## **7. Экспериментальный образец вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива.**

Асферические зеркала позволяют значительно увеличить поле зрения проекционного объектива и его числовую апертуру (пространственное разрешение) при тех же геометрических размерах системы и меньшем числе оптически элементов. Последнее является наиболее актуальным для литографических приложений с учетом требований к производительности процесса засветки и большим потерям при отражении EUV излучения от многослойных зеркал. Традиционная промышленность может изготавливать зеркала с точностью формы поверхности почти на два порядка хуже требуемой. На настоящий момент только фирма Цайс (Германия) и частично General Optics (США) и Canon (Япония) обладают технологиями изготовления зеркал с требуемой для EUV литографии точностью. На свободном рынке, в силу трудоемкости изготовления и стратегического характера продукта, ни оптика, ни тем более оборудование и технологии, не представлены. Поэтому, для создания требуемой оптики в ИФМ РАН в последние годы интенсивно проводились исследования и разработки в области аттестации формы оптических элементов, суперполировки и окончательной доводки формы поверхностей методами напыления тонких пленок и ионно-пучкового травления до субнанометрового уровня, а так же методы бездеформационного монтажа оптики в металлические оправы [96-100].

Измерение формы элементов и волновых aberrаций оптических систем производились с помощью разработанного интерферометра с дифракционной (сферической) волной сравнения. При малых отклонениях асферических поверхностей от ближайшей сферы для их аттестации можно применять интерферометры со сферической эталонной волной [101, 102]. Однако в большинстве случаев прямое применение такого интерферометра приводит к значительной потере точности. Это обусловлено, прежде всего, большим числом наблюдаемых интерференционных полос, что затрудняет точное определение положения минимумов. На 11 а) приведена интерферограмма для вогнутого асферического зеркала M2 нанолитографа (см. пункт 6 настоящего отчета), полученная по классической схеме измерения вогнутых сферических поверхностей. Максимальное отклонение поверхности от сферы составляло около 6,65 мкм. Из рисунка видно, что эта интерферограмма не может быть надежно обработана. Более того, ее верхняя часть вообще отсутствует, что связано с большим, более 100 мкм, пятном фокусировки. Часть отраженного от исследуемой поверхности пучка проходит выше зеркала (поз. 5, рис. 12), не отразившись в наблюдательную систему.

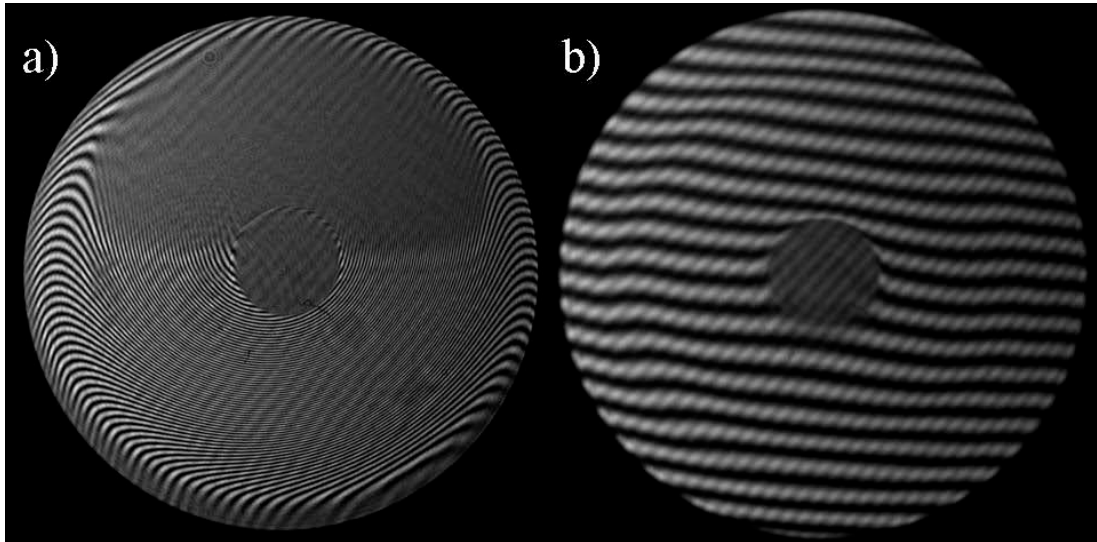


Рисунок 11 - Интерферограммы асферического зеркала M2 нанолитографа: а) - полученная при стандартном способе регистрации с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения; б) - с использованием компенсатора.

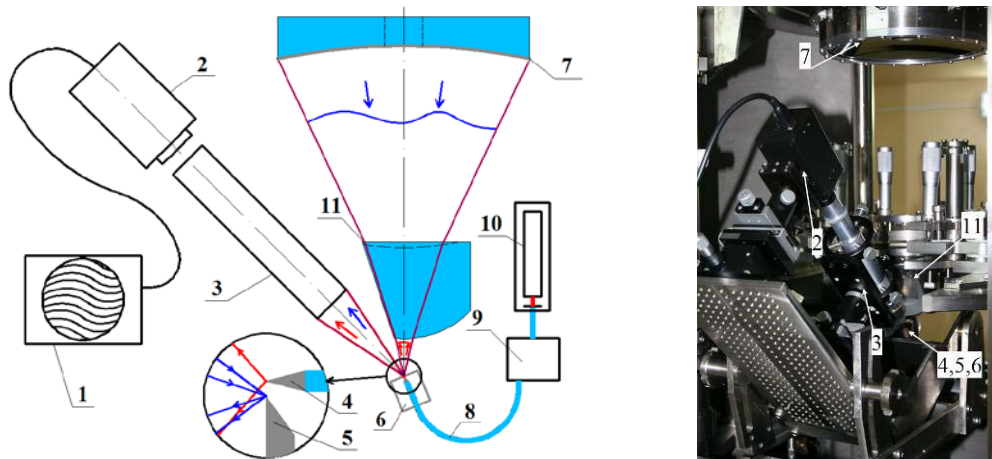


Рисунок 12 - Оптическая схема интерферометра для аттестации вогнутых асферических поверхностей с помощью компенсатора (слева) и фотография (справа). 1 – ПК, 2 – регистрирующая система, 3 – наблюдательная система, 4 – источник сферической волны, 5 – плоское зеркало с острым краем, направляющее отраженный от исследуемой детали свет в регистрирующую систему, 6 – трехкоординатный прецизионный стол, 7 – исследуемая вогнутая асферическая поверхность, 8 – одномодовое оптическое волокно, 9 – поляризационный контроллер, 10 – лазер, 11 – компенсатор.

Одним из наиболее эффективных методов решения этой проблемы является применение оптического компенсатора, преобразующего сферический эталонный фронт в асферический, по форме близкий к исследуемой поверхности. Для учета деформаций



фронта, обусловленных погрешностями самого компенсатора, поверхности компенсатора должны быть только сферическими. В этом случае их можно аттестовать с субнанометровой точностью, применяя интерферометр со сферической эталонной волной [97].

Схема измерений вогнутой асферической поверхности с помощью компенсатора приведена на рис. 12. Аберрация, которую приобретает волновой фронт, проходя через компенсатор, описывается четырьмя параметрами системы «источник-компенсатор». Это радиусы первой и второй по счёту от источника поверхностей компенсатора, расстояние от источника до первой поверхности, и расстояние между поверхностями компенсатора (толщина). Оптимизация параметров компенсатора производилась минимизацией разности продольных аберраций компенсатора и изучаемой асферики методом, подробно изложенным в [103]. При оптимизации компенсатора учитывали, что максимальный измеряемый радиус кривизны его сферических поверхностей ограничен длиной интерферометра ( $\approx 1800$  мм).

Для приведенного выше вогнутого асферического зеркала нанолитографа M2, параметры оптимизированного компенсатора из стекла K8 для длины волны  $\lambda=0,6328$  мкм составили: радиус первой (выпуклой) поверхности  $R_1=64,80$  мм; радиус вогнутой поверхности  $R_2=199,30$  мм, длина компенсатора (расстояние между вершинами сфер) 64,80 мм, расстояние между источником сферической волны и первой поверхностью 17,80 мм, расстояние между источником и вершиной асферической поверхности 410,91 мм. Расчетное *RMS* отклонение волнового фронта после компенсатора от формы исследуемой асферики составило  $\lambda/1810$ , что вполне достаточно для аттестации поверхности зеркала нанолитографа. Как видно из рис. 11b), интерферограмма, полученная при помощи этого компенсатора, может уверенно обрабатываться.

Наличие дополнительного элемента в оптической схеме интерферометра потребовало анализа его влияния на точность измерений формы исследуемой поверхности. Среди источников погрешности измерений необходимо выделить деформации волнового фронта, вызванные несовершенством формы поверхностей компенсатора, отклонение толщины (расстояние между вершинами поверхностей) компенсатора от номинального значения и качество юстировки компенсатора в оптической системе.

Учет деформаций поверхностей компенсатора производился с помощью методов, разработанных и изложенных в [97, 98] и впоследствии эти деформации вычитались из измеренной карты поверхности. Коэффициенты разложения деформаций запоминались и

далее вычитались из соответствующих коэффициентов, полученных при измерении асферического зеркала.

Расчет 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  $\lambda/1000$ . Так как традиционные промышленные технологии изготовления оптических компонентов гарантируют точность толщины оптических деталей на уровне  $\pm 20$  мкм, то возникающие при изготовлении компенсаторов ошибки толщины не являются критическими.

Наибольшее влияние на деформацию фронта оказывает погрешность установки компенсатора относительно оптической оси системы. Эти деформации изучались следующим образом. Первоначально, с помощью юстировочного лазера, ось компенсатора совмещалась с источником сферической волны. Затем исследуемое асферическое зеркало устанавливалось произвольно относительно оптической оси компенсатора. Снималась карта деформаций поверхности (рис. 13 а). Далее зеркало сдвигалось с шагом 0,2 мм относительно оси и снимались карты деформаций (рис. 13 б, в, г). Как видно из этих рисунков, карта деформаций действительно сильно зависит от положения зеркала. Параметр  $P-V$  (peak-to valley), по сравнению с первоначальным положением зеркала, уменьшился в 3,3 раза, а  $RMS$  – в 2,7 раза. Дальнейший сдвиг детали приводит к увеличению параметров  $P-V$  и  $RMS$ .

Известно, что основная внеосевая aberrация (источник излучения находится вне оптической оси системы) – это aberrация комы. Таким образом, если в разложении aberrаций по полиномам Цернике убрать члены, описывающие кому, можно ожидать, что карта и статистические параметры поверхности будут слабо зависеть от точности юстировки. На рис. 14 а, б, в, г приведены карты и значения параметров  $P-V$  и  $RMS$ , соответствующие данным, приведенным на рис. 13, но с убранными членами, описывающими кому. Как видно из этих рисунков, карта поверхности практически остается неизменной при изменении положения зеркала относительно оптической оси прибора на 0,6 мм. Параметры  $P-V$  и  $RMS$  также слабо изменились, менее чем на шесть процентов.

Из этого следует, что погрешность юстировки зеркала-компенсатора может быть надежно учтена при измерений формы поверхности вогнутой асферической детали.

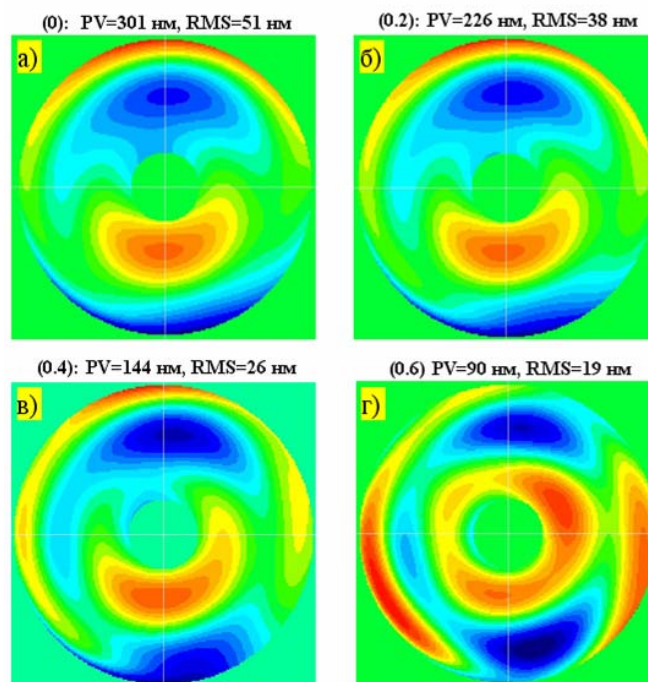


Рисунок 13 - Карты и статистические характеристики деформаций поверхности асферического зеркала в зависимости от разъюстировки относительно оптической оси прибора.

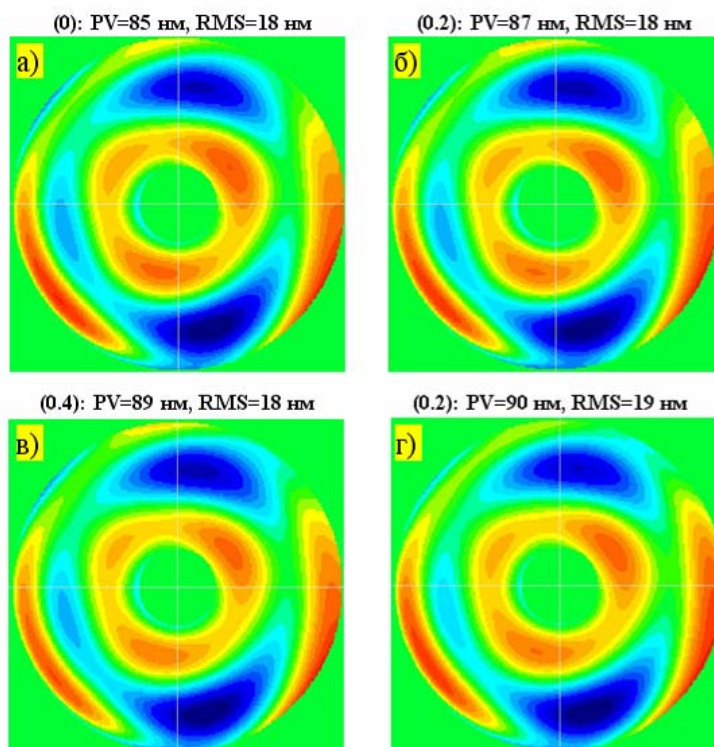


Рисунок 14 - Карты и статистические характеристики деформаций поверхности асферического зеркала в зависимости от разъюстировки зеркала-компенсатора относительно оптической оси прибора с убранными членами разложения, ответственными за aberrацию комы.

За отчетный период эти методы были применены при аттестации и коррекции формы вогнутого асферического зеркала нанолитографа M2, фотография которого приведена на рис. 15.



Рисунок 15 - Фотография асферического зеркала нанолитографа M2, клеенного в металлическую оправу.

Результаты испытаний качества поверхности и коэффициента отражения многослойного покрытия, нанесенного на это зеркало, приведены в **Приложениях А, А1 и А2**.

## 8. Экспериментальные образцы $La/B_4C$ многослойных структур с антидиффузионными слоями и изучение их отражательных характеристик и структурных параметров.

Многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора  $\lambda$  ( $\approx 6,7$  нм) представляют значительный интерес в связи с развитием рентгеновских методов анализа содержания бора в легированных полупроводниках, диагностики плазмы, астрономии и нанолитографии. Расчеты показывают, что для спектральной области  $\lambda \approx 6,7$  нм на основе пары материалов  $La/B$ , в принципе, могут быть изготовлены многослойные структуры (МС) нормального падения с пиковыми коэффициентами отражения около 80%, что значительно превышает теоретический предел ( $\sim 50\%$ ) для традиционно используемых в этом диапазоне МС на основе  $Mo/B_4C$  [1-6]. Однако при использовании технологии магнетронного распыления нанесение слоев чистого бора затруднено, поэтому на практике обычно бор заменяют различными карбидами бора, наиболее часто из которых применяют  $B_4C$ . Так, для зеркал  $La/B_4C$  с периодом 8,5 нм и числом периодов  $N = 40$  характерное значение коэффициента отражения составляет  $R = 53\%$  для  $s$ -поляризованного излучения на линии бора  $B(K_\alpha)$  [104-108], что соответствует для случая не поляризованного излучения  $R \approx 45\%$ . Для МС с периодом  $d \approx 3,4$  нм получены коэффициенты отражения  $R = 43\%$  на  $\lambda = 6,66$  нм,  $R = 39\%$  на  $\lambda = 6,76$  нм и  $R = 18\%$  на  $\lambda = 6,59$  нм [109]. Изучение  $La/B_4C$  МС с параметрами  $d = 10$  нм,  $N = 50$  методами электронной микроскопии показало аморфность слоев лантана и карбида бора. На основании приведенной фотографии скола МС делается заключение о широкой переходной области, образующейся при осаждении карбида бора на лантан [105].

Таким образом, к настоящему моменту коэффициенты отражения  $La/B_4C$  МС при нормальном падении существенно уступают расчетным значениям. В рамках данного проекта изучались причины отмеченного расхождения.

Многослойные структуры наносились методом магнетронного напыления на суперполированные пластины кремния со среднеквадратичной высотой микронеровностей  $\approx 0,3$  нм. В различных экспериментах мишени могли распыляться или в режиме постоянного тока ( $DC$ ), или в высокочастотном режиме ( $RF$ ) в среде аргона при давлении  $p = 8 \times 10^{-4}$  тор, давление остаточных газов не превышало  $10^{-6}$  тор.

С целью определения периода МС, соотношения толщины слоев материалов и оценки высоты межслоевых неровностей границ раздела проводились измерения угловых зависимостей отражения МС методом малоугловой рентгеновской дифракции на рентгеновском дифрактометре Phillips X'Pert PRO. Измерения в мягком рентгеновском

диапазоне проводились с использованием стенда, созданного на основе спектрометра-монокроматора РСМ-500 [110, 111] на  $K\alpha$  линии бора. Отметим, что для получения линии  $B K\alpha$  в качестве материала анода рентгеновской трубки применялось соединение  $B_4C$ , поэтому из-за химического взаимодействия максимум линии излучения бора оказывается несколько смещен от табличного значения  $\lambda_B(K\alpha) = 6,76$  нм к  $\lambda_B = 6,69$  нм. Внутренняя структура зеркал  $La/B_4C$  дополнительно изучалась с привлечением методов электронной микроскопии.

Характерные параметры отражения МС, предназначенных для работы вблизи нормали на длине волны 6,69 нм, приведены в таблице 4, а также на рис. 16(а). Структуры, идентификационные номера которых начинаются с  $A$  (как  $A2420$ ) или  $LVP$  ( $LVP27$ ) изготовлены на 2-х магнетронной установке, с  $PM$  ( $PM 830$ ) - на 4-х магнетронной. Значения  $R_{id}$  соответствуют расчетной величине пикового коэффициента отражения МС с нулевыми межслоевыми неровностями при табличных плотностях материалов.

**Таблица 4** - Отражательная способность МС  $La/B_4C$  и  $Ce/B_4C$  ( $d \approx 3,4$  нм), на длине волны  $\lambda = 6,69$  нм, расчетное значение  $R_{id}$  соответствует  $\beta = 0,5$ .

МС	Идентификатор	$\theta_{max}$ (°)	$\lambda/\Delta\lambda$	$R_{max}$ (%)	$R_{id}$ (%)
$La/B_4C$	$PM680$	74,35	126	44	65
	$A2397$	80,61	115,5	33	
	$A2408$	78,7	122	38	
	$A2413$	79,66	116	37	
	$A2418$	77,91	111,5	37	
	$A2419$	80,45	120	40	
$La/B_9C$	$A2428$	72,08	107	38	66
$Ce/B_4C$	$LVP27$	80,6	108	33	57
	$LVP31$	82,88	109	36	
	$LVP32$	77,71	110	35	

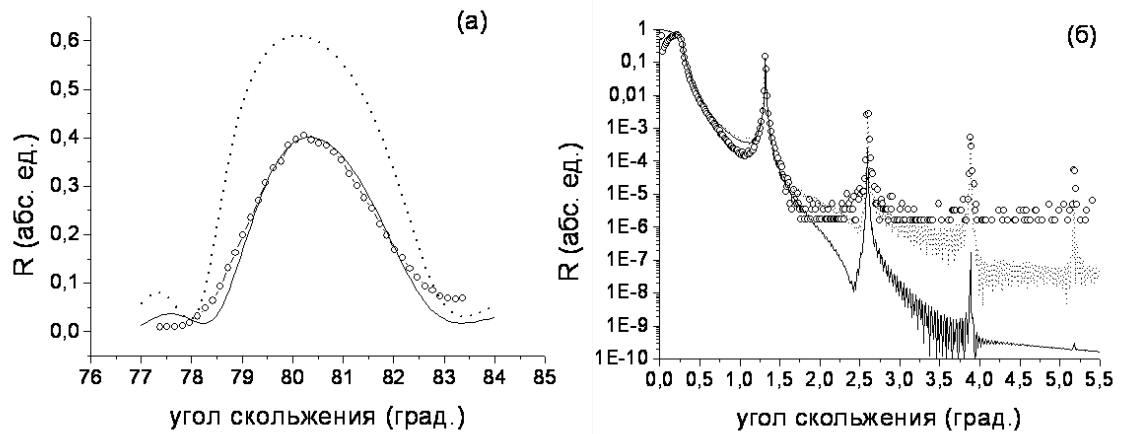


Рисунок 16 - Отражательная характеристика МСС A2419 ( $La/B_4C$ ,  $N = 150$ ) на длинах волн а)  $\lambda = 6,69$  нм; б)  $\lambda = 0,154$  нм. Расчетные кривые приведены для параметров  $d = 3,42$  нм,  $\beta = 0,4$ ,  $\sigma = 0,55$  нм (сплошная линия) и  $d = 3,42$  нм,  $\beta = 0,43$ ,  $\sigma = 0,3$  нм,  $\rho_{La} = 5,0$  г/см<sup>3</sup> (пунктир).

Полученные результаты показывают, что увеличение содержания бора в слоях карбида бора путем замены  $B_4C$  на  $B_9C$  не оказывает существенного влияния на отражательные характеристики зеркал, а коэффициенты отражения реальных структур при нормальных углах падения оказываются на 20 – 30% ниже теоретических значений. Причиной столь сильного отличия коэффициентов отражения МС от теоретически предсказанных значений могут быть неверные оптические константы материалов, отклонение плотностей пленок от табличных, влияние переходных областей. Для подтверждения достоверности применяемых в расчетах оптических констант материалов в области  $\lambda = 6,7$  нм была проведена серия экспериментов с зеркалами, имеющими период  $d \approx 7$  нм. Значения пиковых коэффициентов отражения и величин спектральной селективности приведены в таблице 5.

Для таких МС коэффициенты отражения относительно слабо зависят от ширины межслоевых областей и характерных, на уровне 0,2-0,5%, флуктуаций периода. Кроме того, при больших толщинах пленок их плотности стремятся к табличным значениям, соответственно, основным фактором, определяющим отражение в мягком рентгеновском диапазоне, являются рентгенооптические константы материалов МС.

Можно видеть, что измеренные коэффициенты отражения приближаются к теоретическому пределу для неполяризованного излучения. Этот результат подтверждает, что оптические константы, использованные в расчетах, адекватны. Если принять, что плотности веществ соответствуют табличным значениям, примерные величины

межслоевой шероховатости составят  $\approx 0,45$  нм для  $La/B_4C$ ,  $\sigma \approx 0,4$  нм для  $Ce/B_4C$  и  $\sigma \approx 0,8$  нм для  $La/B_9C$ . Таким образом, для  $La/B_9C$ , содержащего большее количество бора, качество МС оказывается значительно худшим, что может быть связано с протеканием химических реакций между  $La$  и  $B$ , приводящих к образованию переходных областей на гетерограницах МС.

**Таблица 5** - Отражательная способность  $La/B_4C$ ,  $Ce/B_4C$  и  $La/B_9C$  ( $d \approx 7$  нм), измеренная на длине волны  $\lambda = 6,69$  нм, расчетное значение  $R_{id}$  соответствует  $\beta = 0,5$ .

МС	Идентификатор	$\theta_{max}$ (°)	$\lambda/\Delta\lambda$	$R_{max}$ (%)	$R_{id}$ (%)
$La/B_4C$	A2420	28,95	34	56	60
$Ce/B_4C$	LVP33	28,82	32	47	49
$La/B_9C$	A2427	27,06	29	59	64

Зависимость коэффициента отражения зеркал от соотношения толщин слоёв материалов в периоде исследовалась для зеркал с периодом  $\cong 7$  нм. Пиковые коэффициенты отражения и значения селективности приведены в таблице 6. С точки зрения максимизации коэффициента отражения  $R$ , оптимальная доля  $La$  в периоде составляет  $\cong 0,56$ . При этом увеличение селективности для структуры с  $\beta = 0,61$  может быть связано с меньшим периодом данной структуры.

**Таблица 6** - Зависимость коэффициента отражения зеркал  $La/B_4C$  на длине волны  $\lambda = 6,69$  нм от толщины слоя  $La$  в периоде.

$\beta=d_{La}/d$	0,4	0,455	0,5	0,52	0,56	0,61
$R$ , %	41	43,3	48,3	50,5	51,5	47,3
$\lambda/\Delta\lambda$	44	39	36	34	32	38*

Для изучения внутреннего строения синтезированных МС проводились исследования отражения структур на длине волны  $Cu$  ( $K\alpha$ )  $\lambda = 0,154$  нм. При этом в зависимости от периода МС в отражательной характеристике можно увидеть до 6-7 ( $d \approx 7$  нм) дифракционных пиков, анализ которых позволяет получить информацию о структуре МС. Соответствующий метод восстановления основных характеристик МС по сопоставлению коэффициентов отражения в трех «кинематических» ( $R \ll 1$ ) пиках, был



предложен в работе [112]. Применение указанной методики к МС  $A2420$  ( $La/B_4C$ ,  $d \sim 7$  нм) не позволило получить величины шероховатостей  $\sigma$  и доли тяжёлого материала в периоде  $\beta$ , сколько-нибудь достоверно описывающие вид всей кривой отражения.

По этой причине нами была предпринята попытка непосредственной подгонки экспериментальных данных. Отметим, что измерения в жестком рентгеновском диапазоне производились с шагом  $0,002^\circ - 0,003^\circ$ , в то время как на приведенных рисунках (16(b), 17(b), 20(b)) точки проставлены в 5 раз реже для облегчения зрительного восприятия.

Для структуры  $A2420$  (рис. 17) расчетная и измеренная кривые отражения совпадают достаточно хорошо при выборе параметров МСС на уровне  $d = 7,123$  нм,  $\beta = 0,48$ ,  $\sigma = 0,6$  нм и плотностей пленок  $\rho_{La} = 5,5$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{B_4C} = 1,8$  г/см<sup>3</sup> (табличные значения для массивных материалов составляют  $\rho_{La}^T = 6,17$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{B_4C}^T \cong 2,54$  г/см<sup>3</sup>). В то же время для МСС  $A2419$  (рис. 17) результаты подгонки оказываются несколько обескураживающими: можно видеть, что величина межслоевой шероховатости  $\sigma = 0,55$  нм, полученная подгонкой данных измерений на длине волны  $\lambda = 6,69$  нм, почти вдвое превышает значение  $\sigma = 0,3$  нм, соответствующее результатам измерений на длине волны  $\lambda = 0,154$  нм. Тем не менее, на длине волны  $\lambda = 0,154$  нм для обоих зеркал даже при варьировании плотностей не удастся добиться хорошего совпадения экспериментальной и теоретической кривых в области высших дифракционных пиков.

Обращает на себя внимание еще один факт. Несмотря на то, что соотношение толщин материалов в периоде структур  $A2420$  и  $A2419$  одинаково (при различающемся вдвое периоде), в жестком диапазоне дифракционная картина для них различна. Так  $A2420$  демонстрирует подавленный второй пик (рис. 17(b)), что соответствует  $\beta \cong 0,5$ , в то время как для  $A2419$  понижения второго пика не наблюдается (рис. 16(a)). С другой стороны, провала второго пика при  $\beta \cong 0,5$  мы вправе ожидать только для МСС с симметричным профилем диэлектрической проницаемости в периоде структуры, в противном случае (например, если она имеет вид неравнобедренной трапеции) даже при  $\beta = 0,5$  вторая гармоника не пропадает. Асимметрия профиля диэлектрической проницаемости означает, иными словами, разные ширины переходных областей на гетерограницах. На тот же эффект указывает и факт разных величин шероховатостей, получаемых из данных в мягком и жестком рентгеновском диапазонах. В этом случае из-за малого поглощения в жестком рентгеновском диапазоне можно ожидать высокого коэффициента отражения в старших брэгговских пиках за счет отражения от одной «хорошей» границы. В мягком рентгеновском диапазоне пренебречь «плохой» границей нельзя из-за сильного поглощения излучения.

Таким образом, по данным рентгеновской дифракции, наиболее вероятной причиной наблюдаемого расхождения между расчетными и экспериментально полученными значениями коэффициентов отражения в мягком рентгеновском диапазоне является химическое взаимодействие между *La* и *B*, приводящее к образованию протяженных переходных областей разной ширины на гетерограницах.

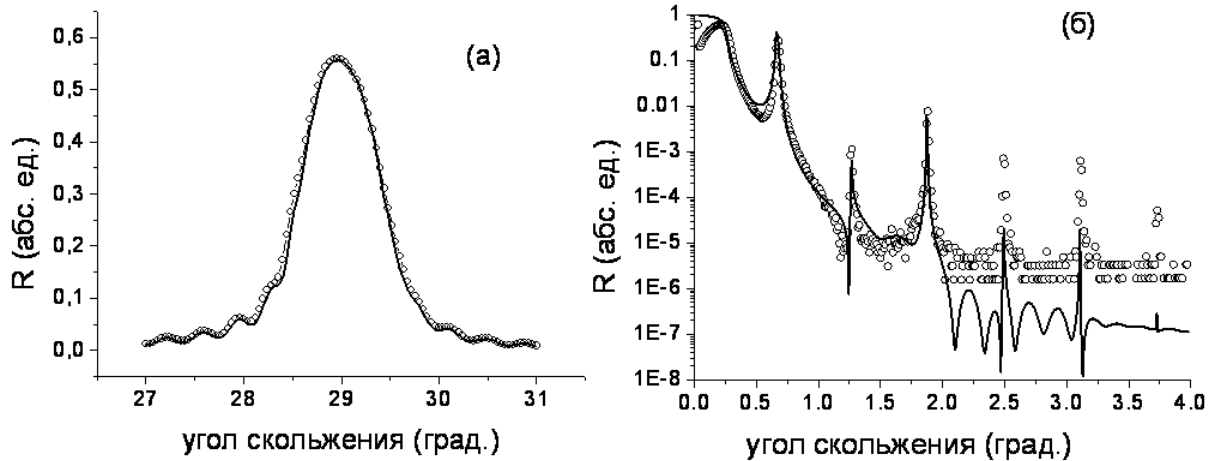


Рисунок 17 - Отражательная характеристика A2420 (*La/B<sub>4</sub>C*,  $N = 75$ ) на длинах волн а)  $\lambda = 6,69$  нм; б)  $\lambda = 0,154$  нм. Расчетная кривая приведена для параметров  $d = 7,13$  нм,  $\beta = 0,48$ ,  $\sigma = 0,6$  нм,  $\rho_{La} = 5,5$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{B_4C} = 1,8$  г/см<sup>3</sup>.

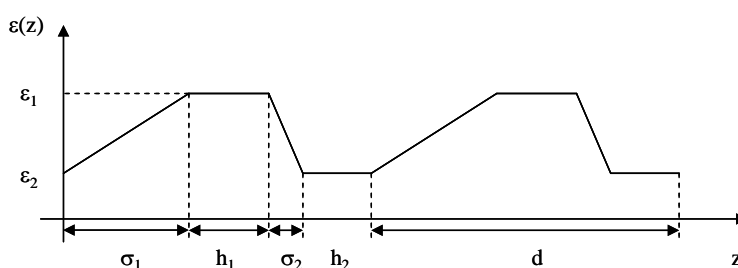
На основе вышесказанного была предложена модель МС, представляющая собой периодическую последовательность неравнобедренных трапеций (рис. 18). Т.о., в первом приближении переходные области моделируются линейными участками протяженности  $\sigma_1$  (*La*-на-*B<sub>4</sub>C*) и  $\sigma_2$  (*B<sub>4</sub>C* - на- *La*). Область, занимаемая «чистым» *La* имеет ширину  $h_1$ , карбидом –  $h_2$ . Для такой структуры также можно ввести параметр, определяющий долю сильнопоглощающего вещества в периоде  $\beta$ , вычисляемую из соотношения

$$\frac{1}{d} \int_0^d \varepsilon(z) dz = \varepsilon_1 \beta + \varepsilon_2 (1 - \beta).$$

Для вычисления коэффициента отражения такой структуры производилось разбиение переходных областей на участки с локально-однородной плотностью, а затем применялся стандартный метод рекуррентных соотношений для слоистой структуры с резкими границами. Нетрудно показать, что в случае  $\sigma_1 \neq \sigma_2$  даже при  $\beta = 0,5$  в отражательной характеристике наблюдаются заметные четные пики, что говорит о неприменимости стандартных методов анализа структуры МС, подобных [112], т.е.

основанных на анализе соотношения высот дифракционных пиков в модели симметричных границ.

На основе предложенной модели была произведена подгонка экспериментальных данных (рис. 19), демонстрирующая гораздо лучшее согласование с экспериментом по сравнению с методом Дебая-Валера. (ср. рис. 16). В результате получены следующие значения параметров МСС: «чистый»  $La$  занимает 2,07 нм, а  $B_4C$  – 0,30 нм, ширины переходных областей составили 0,71 нм и 0,33 нм, причем с учетом точности измерений оказывается невозможным различить случаи, когда более уширенной оказывается одна или другая граница. Плотности материалов выбраны на уровне  $\rho_{La}=5,40\text{г/см}^3$ ,  $\rho_{B_4C}=2,52\text{г/см}^3$ . Согласно приведенным параметрам, слой лантана в каждом периоде МСС



оказывается намного шире, чем слой карбида бора.

Рисунок 18 - Профиль диэлектрической проницаемости МС по глубине в случае трапецидальной модели.

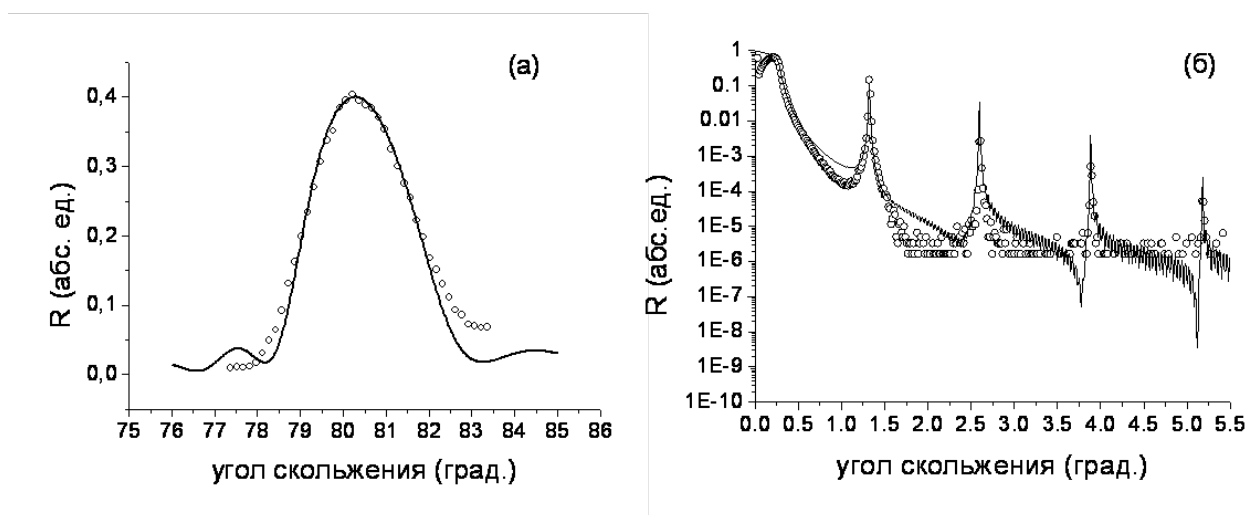


Рисунок 19 - Отражательная характеристика МС А2419: подгонка на основе трапецидальной модели: а)  $\lambda = 6,69\text{ нм}$ ; б)  $\lambda = 0,154\text{ нм}$ .

### Экспресс-оценка ширины переходных областей

Прямая подгонка экспериментальных данных является сложной рекурсивной задачей с большим числом степеней свободы. Поэтому представляет интерес развитие методик, позволяющих быстро восстановить качественный вид профиля диэлектрической

проницаемости по глубине  $\varepsilon(z)$ . Такая методика была разработана для МС, но с близкими толщинами материалов слоев в периоде ( $\beta = 0,5$ ). Последнее практически не ограничило изучение конкретных МС, т.к. в исследуемых МС оптимальная величина  $\beta$  как раз близка к 0,5.

Из-за перемешивания веществ на гетерограницах функция  $\varepsilon(z)$  (координата  $z$  перпендикулярна поверхности МС) может иметь довольно сложный вид, однако ее можно промоделировать, разбивая период  $d$  на локально-однородные участки, каждый из которых образован обоими веществами, взятыми в долях  $C(z)$ :  $\varepsilon_1 C(j) + \varepsilon_2 [1 - C(j)] = \varepsilon(z_j)$ ,  $z_j$  - положение участка. Нетрудно видеть, что такое представление позволяет записать  $\varepsilon(z)$  в виде

$$\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \mathcal{E}(z), \quad (8.1)$$

где  $\varepsilon_{1,2}$  - комплексные диэлектрические проницаемости материалов МС, а  $\mathcal{E}(z)$  действительная функция, изменяющаяся в пределах  $[-1; 1]$ , не зависящая от конкретных веществ. (Отметим, что для структур, образованных тремя и более компонентами, такое представление невозможно.) Разложив (8.1) в ряд Фурье, получим

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} a_m^{norm} \cos(q_m z) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m^{norm} \sin(q_m z) \right\},$$

где  $a_m^{norm}, b_m^{norm}$  - нормированные действительные амплитуды гармоник, определяющиеся только геометрией задачи (не зависят от диэлектрических проницаемостей веществ МСС). В общем виде коэффициент отражения МС в  $m$ -ом пике определяется выражением:

$$r_m = \frac{i\Delta_{\pm m} \operatorname{th}\left(\sqrt{\Delta_{+m}\Delta_{-m} - u_m^2} L\right)}{\sqrt{\Delta_{+m}\Delta_{-m} - u_m^2} - iu_m \operatorname{th}\left(\sqrt{\Delta_{+m}\Delta_{-m} - u_m^2} L\right)},$$

где 
$$u_m = \frac{1}{q_m} \left[ k_0^2 (\varepsilon_0 - \sin^2 \theta) - q_m^2 / 4 \right], \quad \Delta_{\pm m} = \frac{k_0^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{q_m} (a_m^{norm} \pm i b_m^{norm}).$$

При условии  $\beta = 0,5$  профиль электронной плотности с различным наклоном боковых граней можно представить нечетной функцией и разложить в ряд по синусам, соответственно,  $a_m^{norm} = 0$ . Будем считать также, что справедливо кинематическое

приближение  $\gamma_m L \ll 1$ , что позволяет выразить пиковый коэффициент отражения ( $\text{Re} u_m = 0$ ) в виде  $R_m \propto (b_m^{norm})^2$ :

$$R_m = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{2\pi N}{m}\right)^2 (b_m^{norm})^2. \quad (8.2)$$

Соответственно, измеряя несколько значений  $R_m$  на длине волны  $\lambda = 0,154$  нм, можно восстановить значения  $b_m^{norm}$ , после чего с помощью (8.2) построить профиль диэлектрической проницаемости МС. Знаки  $b_m^{norm}$  могут быть выбраны из соображений разумности результирующего профиля. Отметим, что при этом скачок диэлектрических проницаемостей  $|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|^2$  оказывается одинаковым для разных гармоник и, таким образом, конкретные значения плотностей не оказывают влияние на вид профиля.

Профили диэлектрической проницаемости, рассчитанные для структур A2419 и A2420 по данной методике, приведены на рис. 20. Можно видеть, что во всех случаях наблюдается различие в толщинах переходной области на разных границах. Отметим, что описанная методика позволяет оценить степень несовершенства структуры, но не определить, какая из границ уширена сильнее.

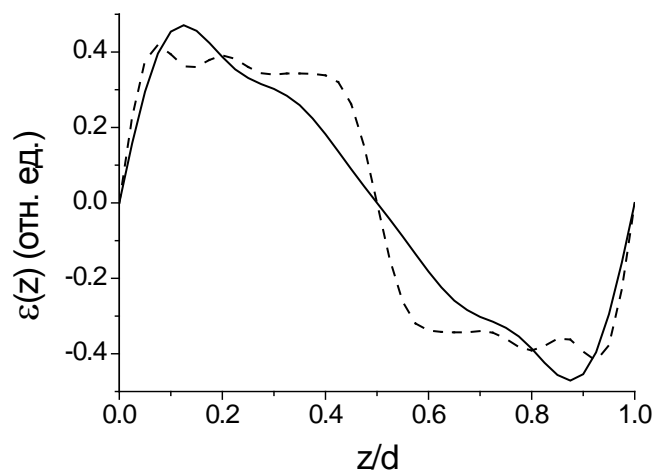


Рисунок 20 - Восстановления профиля диэлектрической проницаемости в периоде для структур A2419 с  $d \approx 3,4$  нм (сплошная линия) и A2420 с  $d \approx 7$  нм (пунктир).

Исследования срезов МС на просвет проводились на электронном микроскопе JEM 2000 EX в режиме высокого разрешения при ускоряющем напряжении 100 кВ. Для изготовления поперечного сечения использовался FIB-метод [113]. На рис. 21 (а) приведена электронограмма МС  $La/B_4C$  с периодом 3,4 нм, демонстрирующая серию

дифракционных пиков дифрагированных электронов, что говорит о высокой периодичности структуры. Отсутствие четких рефлексов от кристаллических решеток La и B<sub>4</sub>C может свидетельствовать об аморфоподобном состоянии слоев этих материалов. В изображении также видны дифракционные максимумы, соответствующие кремниевой подложке. Типичная фотография среза *La/B<sub>4</sub>C*, приведенная на рис. 21 (б), подтверждает высокое качество напыленных слоев и позволяет сделать вывод о сохранении сплошности пленок в различных слоях МС.

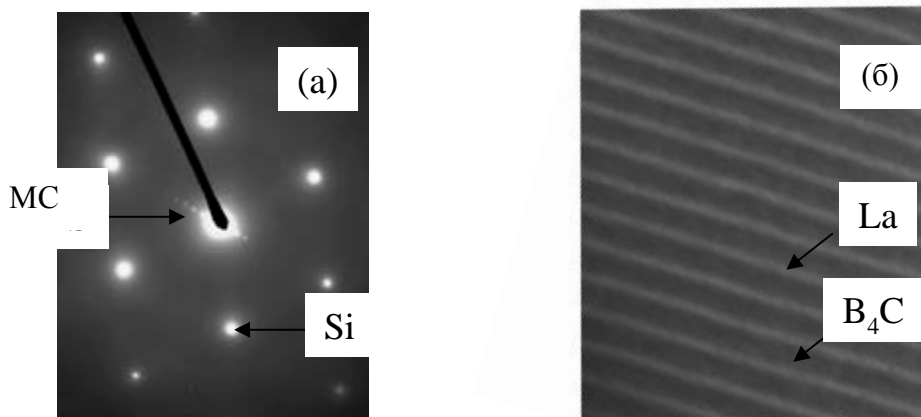


Рисунок 21 - Электронно-микроскопическое исследование МС *La/B<sub>4</sub>C*: а) электронограмма, б) изображение среза.

Поскольку основной причиной отличия отражательных характеристик *La/B<sub>4</sub>C* от теоретически предсказанных на данный момент видится высокая химическая активность *La* и *B*, приводящая к образованию на гетерограницах химических соединений *La<sub>x</sub>B<sub>y</sub>*, с целью затруднения взаимного проникновения *La* и *B* можно использовать буферные слои. В качестве материалов для них были выбраны *Cr*, *Mo* и *Sn*, известные своей низкой химической активностью и малым поглощением в окрестности  $\lambda = 6,7$  нм.

На первом этапе с целью изучения взаимодействия слоев *La* и *B<sub>4</sub>C* с барьерными слоями были изготовлены МС типа *La/Cr*, *La/Mo*, *Cr/B<sub>4</sub>C*, *Mo/B<sub>4</sub>C* с периодом  $d = 7-8$  нм ( $N = 60$ ) и близкими толщинами слоев в периоде ( $\beta \approx 0,5$ ). Характеристики изготовленных МС изучались методом рефлектометрии на длинах волн  $\lambda = 0,154$  нм, 6,69 нм и 13,4 нм.

Можно отметить, что хотя МС *La/Sn* и *B<sub>4</sub>C/Sn* с периодами 7-8 нм не удалось изготовить, т.к. при нанесении слои олова толщиной в единицы нанометров собирались в капли, тем не менее, МС с *Sn* барьерными слоями были синтезированы и изучены.

Для  $Cr/La$  МС наиболее близкое совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей получается при плотности слоев лантана  $\rho_{La} = 5,5 \text{ г/см}^3$  и величине межплоскостных шероховатостей на уровне  $\sigma = 0,55 \text{ нм}$ . Коэффициент отражения неполяризованного излучения на длине волны  $6,69 \text{ нм}$  при этом составил  $R_{6,69} = 9 \%$  при угле  $\theta = 27^\circ$ . Для соединения  $Mo/La$  величины переходных границ также находятся на уровне  $\sigma = 0,5 - 0,55 \text{ нм}$  при плотностях  $\rho_{Mo} = 9,5 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{La} = 6,0 \text{ г/см}^3$  ( $R_{6,69} = 4,2\%$ ,  $\theta = 28,75^\circ$ ).

Для бинарных структур на основе  $Cr/B_4C$  расчет и эксперимент наиболее близко согласуются при ширине межслоевых границ, равной  $0,4 - 0,5 \text{ нм}$  и плотности карбида  $\rho_{B_4C} = 2,54 \text{ г/см}^3$  ( $R_{6,69} = 23,85\%$ ,  $\theta = 27,86^\circ$ ).  $Mo/B_4C$  демонстрирует несколько меньшую шероховатость  $\sigma = 0,35 \text{ нм}$  при большем отклонении плотности  $B_4C$  от табличного значения.

Таким образом, проведенные исследования не позволяют сделать вывод о качественном преимуществе одного барьерного материала перед другим. Вместе с тем необходимо отметить, что в сочетаниях с молибденом лантан демонстрирует значения плотности, более приближенные к табличным.

Результаты серии исследований  $La/B_4C$  МС с прослойками  $Mo$  приведены на рис. 22. Разделительный слой осаждался как на  $La$  ( $La/Mo/B_4C$ ), так и на  $B_4C$  ( $La/B_4C/Mo$ ). Для обеих структур, как большепериодной, так и короткопериодной, введение прослоек  $Mo$  толщиной  $0,5 \text{ нм}$  дает отрицательный результат при нанесении на  $B_4C$  и практически не оказывает влияния при нанесении на  $La$ .

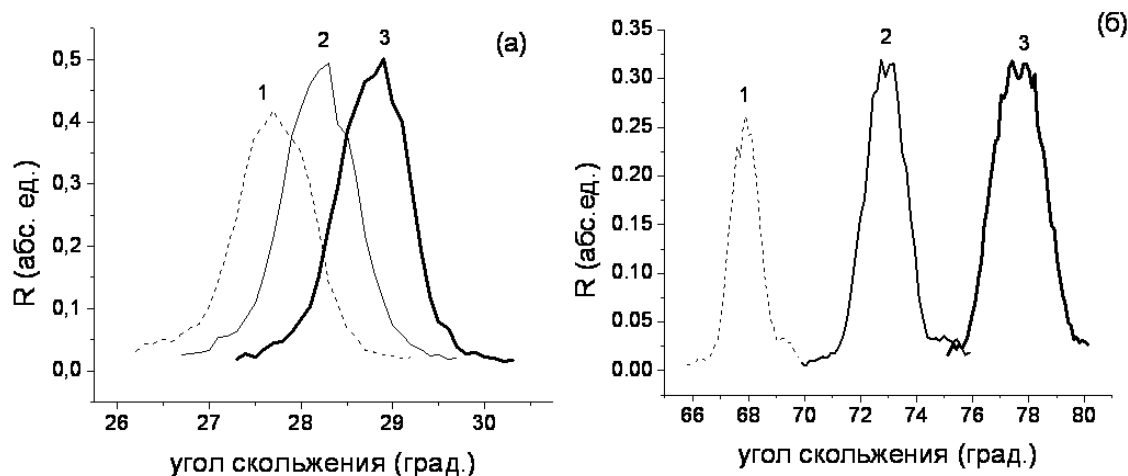


Рисунок 22 - Отражательные характеристики  $La/B_4C$ -зеркал с барьерными слоями  $Mo$ , измеренные на  $\lambda = 6,69 \text{ нм}$ : 1 –  $La/Mo/B_4C$ , 2 –  $La/B_4C/Mo$ , 3 –  $La/B_4C$ . а)  $d \approx 7 \text{ нм}$ ,  $h_{Mo} = 0,5 \text{ нм}$ ; б)  $d \approx 3,5 \text{ нм}$ ,  $h_{Mo} = 0,25 \text{ нм}$ .

Проанализируем влияние антидиффузионной прослойки на коэффициенты отражения зеркал в окрестности длины волны 6,69 нм. Нанесение антидиффузионных прослоек (например, *Mo*) на “хорошие” границы должно приводить к уменьшению коэффициента отражения из-за преимущества оптических констант лантана перед молибденом в этой области. В тоже время нанесение прослойки на “плохую” границу может, как повысить отражение (за счет подавления процессов перемешивания), так и оставить неизменной или понизить, если пленка оказывается проницаема для материалов МС. Таким образом, полученный результат (рис. 22) косвенным образом указывает на большую уширенность границы *La*-на-*B<sub>4</sub>C* в противовес результатам, полученным в работе [105].

В структуре *La/B<sub>4</sub>C/Sn* прослойка олова 0,3 нм также привела к снижению отражения на 2%. Отметим, что зеркала, содержащие прослойки *Cr* не изготавливались, поскольку предварительное исследование *Cr/La*, *Cr/B<sub>4</sub>C*, *Mo/La* и *Mo/B<sub>4</sub>C* бинарных структур продемонстрировали практическую идентичность барьерных свойств *Cr* и *Mo*.

Резюмируя вышесказанное, можно говорить об отсутствии положительного влияния прослоек *Sn*, *Cr* и *Mo* на отражательные характеристики *La/B<sub>4</sub>C* МС.

Таким образом, в рамках данных исследований были изготовлены и исследованы многослойные структуры *La/B<sub>4</sub>C* и *La/B<sub>9</sub>C*, предназначенные для отражения рентгеновского излучения с длинами волн в области  $\lambda \approx 6,7$  нм. Для не поляризованного излучения на длине волны 6.69 нм продемонстрированы коэффициенты отражения на уровне 40-60% для разных периодов, приближающиеся для большепериодных ( $d \approx 7$  нм) структур к теоретическому пределу. Установлено, что основная причина недостаточно высоких коэффициентов отражения зеркал нормального падения ( $R \approx 45\%$ ) с периодами  $d \approx 3,4$  нм состоит в наличии относительно широких межслоевых областей, образующиеся в результате взаимодействия *B* и *La*, известных своей высокой химической активностью. Косвенные признаки указывают на большую протяженность переходной границы *La* –на-*B<sub>4</sub>C*. Предложен экспресс-метод восстановления профиля диэлектрической проницаемости по данным малоугловой дифрактометрии на длине волны 0,154 нм, позволяющий быстро оценить степень асимметрии и масштабы переходных границ.

Использование барьерных антидиффузионных слоев *Cr*, *Mo* и *Sn* с толщинами 0,3 – 0,5 нм не привело к улучшению отражательных характеристик описанных МС. Увеличение толщины барьерных слоев не имеет смысла, поскольку в оптимизированных на максимум коэффициента отражения МСС нормального падения *La/B<sub>4</sub>C* толщина слоя *La* составляет около 1,5 нм.



Одним из возможных решений данной проблемы является замена в  $La/B_4C$  МС слоя  $La$  его стабильным химическим соединением с удовлетворительными рентгенооптическими характеристиками в окрестности длины волны  $\lambda = 6,7$  нм. Предварительные расчеты указывают на перспективность такого подхода.

Протоколы и результаты испытаний изготовленных образцов МС на основе  $La/B_4C$  приведены в **Приложениях Б, Б1 и Б2**.

## **Заключение**

Все задачи первого этапа проекта выполнены полностью. Подготовлен пакет программ для расчета транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников с несверхпроводящими дефектами различной формы в присутствии заданного неоднородного магнитного поля. Рассчитана зависимость проводимости двумерного электронного газа в неоднородном магнитном поле, созданного доменной структурой ферромагнитной пленки. Создана программа для моделирования равновесных магнитных состояний в многослойных частицах, содержащих несколько слоев ферромагнетика, разделенных немагнитной прослойкой. Разработана теоретическая модель, описывающая особенности протекания спин-зависимого электрического тока через ферромагнетик с неоднородным распределением намагниченности. Разработана рентгенооптическая схема проекционного EUV нанолитографа на основе асферического двухзеркального объектива Шварцшильда. Изготовлен экспериментальный образец вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива. Синтезированы и изучены отражательные характеристики и структурные параметры La/B<sub>4</sub>C многослойных структур с антидиффузионными слоями

По результатам исследований подготовлен научно-технический отчет по I этапу, а также отчет по патентным исследованиям по теме проекта. По полученным результатам опубликована 1 статья и направлено 8 статей в реферируемые журналы. Большая часть полученных результатов также докладывалась на 14-ом Международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (15-19 марта 2010 г., Нижний Новгород) – 1 приглашенный, 2 устных и 5 стендовых докладов.

## Список использованных источников

[1]. **Naulleau, P.P.** Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wave-front metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy / P.P. Naulleau, K.A. Goldberg, S.H. Lee, C.Chang, D. Attwood, J. Bokor // *Appl. Opt.* - 1999. - V.38.No.35. - P. 7252-7263.

[2]. **Dijsseldonk A.** Concept of ASML EUV Tool / Dijsseldonk A. // *Lithography Aspects, NanoCMOS (PullNano)/more Moore event "Beyond 45 nm technologies"*. 9–10 May 2006. - IMEC, Leuven, Belgium.

[3]. **Naulleau P.** Advances at the SEMATECH MET at Berkeley / Naulleau P., Anderson Ch., Dean K. // *International EUVL Symposium, 28 – 31 October 2007.* - Sapporo, Japan.

[4]. **Гапонов, С.В.** Работы в области проекционной EUV-литографии в рамках российской программы / С.В. Гапонов, Е.Б. Ключенков, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, В.Е. Костюков, Л.А. Синегубко, В.Д. Скупов, А.Ю. Седаков // *Материалы симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 25-29 марта 2005.* - Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. - Т.1. - С.44-47.

[5]. **Andreev, S.S.** Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications / S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Kluev, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.Yu. Zuev // *Central European Journal of Physics* 1. - 2003. - P.191-209.

[6]. **Akhsakhalyan A.A.** Multilayer mirror systems to form hard X-ray beams / Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Kharitonov A.I., E.B. Klyuenkov, V.A. Murav'ev, N.N. Salashchenko // *Central European Journal of Physics.* - 2005. - V.3No.2. - P.163-177.

[7]. **Андреев, С.С.** Поляризаторы и фазовращатели на основе многослойных зеркал и свободновисящих пленок для диапазона длин волн излучения 2.1-4.5 нм / С.С. Андреев, М.С. Бибишкин, Х. Кимура, Е.Б. Ключенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашенко, Т. Хироно, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // *Известия академии наук. Серия физическая.* - 2004. - Т.68.№4. - С.565-568.

[8]. **Bibishkin, M.S.** Laboratory methods for investigation of multilayer mirrors in Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray region / M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chkhalo, E.B. Klyuenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev // *Proceedings of SPIE,* 2004. - V.5401 - P.8-15.

[9]. **Бибишкин, М.С.** Двухзеркальный рефлектометр для относительных измерений коэффициентов отражения многослойных зеркал на длине волны 13.5 нм / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, Н.Н.

Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Известия академии наук. Серия физическая. - 2004. - Т.68.№ 4. - С.560-564.

[10]. **Вайнер, Ю.А.** Исследование поперечной корреляции шероховатостей границ в многослойных структурах с ультра-короткими периодами / Ю.А. Вайнер, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, А.А. Фраерман, В.В. Чернов, Н.И. Чхало // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2006. - Т.130.№3. - С.401-408.

[11]. **Клюенков, Е.Б.** Коррекция формы оптических поверхностей с субнанометровой точностью. Проблемы, статус, перспективы / Е.Б. Клюенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С.205-208.

[12]. **Клюенков, Е.Б.** Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью / Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Раскин, М.Н. Торопов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Российские нанотехнологии. - 2008. - Т.3.№9-10. - С.90-98.

[13]. **Кошелев, К.Н.** Работы по созданию источников коротковолнового излучения для нового поколения литографии / К.Н. Кошелев, В.Е. Банин, Н.Н. Салащенко // УФН. - 2007. - Т.177.Вып.7. - С.777-780.

[14]. **Сейсян, Р.** Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (обзор) / Р. Сейсян // ЖТФ. - 2005. - Т.75.Вып.5. - С.1–13.

[15]. **Kozhevnikov I.** / Kozhevnikov I., Peverini L, and Ziegler E. // Optics Express. - 2008. - V. 14. P. 144.

[16]. **Fink, H.J.** Magnetic Irreversible Solution of the Ginzburg—Landau Equations [Текст] / H.J. Fink, A.G. Presson // Phys. Rev. – 1966. – Vol. 151. – P. 219.

[17]. **Fink, H.J.** Superheating of the Meissner State and the Giant Vortex State of a Cylinder of Finite Extent [Текст] / H.J. Fink, A.G. Presson // Phys. Rev. – 1968. – Vol. 168. – P. 399.

[18]. **Geim, A.K.** Phase transitions in individual sub—micrometre superconductors [Текст] / A.K. Geim, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, K.S. Novoselov, F.M. Peeters, V.A. Schweigert // Nature – 1997. – Vol. 390. – P. 259.

[19]. **Singha Deo, P.** Magnetization of Mesoscopic Superconducting Disks [Текст] / P. Singha Deo, V.A. Schweigert, F.M. Peeters, A.K. Geim // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 79. – P. 4653.

[20]. **Schweigert, V.A.** Phase transitions in thin mesoscopic superconducting disks [Текст] / V.A. Schweigert, F.M. Peeters // Phys. Rev. B – 1998. – Vol. 57. – P. 13817.

[21]. **Schweigert, V.A.** Vortex Phase Diagram for Mesoscopic Superconducting Disks

[Текст] / V.A. Schweigert, F.M. Peeters, P. Singha Deo, // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – P. 2783.

[22]. **Geim, A.K.** Fine Structure in Magnetization of Individual Fluxoid States [Текст] / A.K. Geim, S.V. Dubonos, J.J. Palacios, I.V. Grigorieva, M. Henini, J.J. Schermer // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85. – P. 1528.

[23]. **Caroli, C.** Bound Fermion states on a vortex line in a type II superconductor [Текст] / C. Caroli, P.G. de Gennes, J. Matricon // Phys. Lett. – 1964. – Vol. 9. – P. 307.

[24]. **Hess, H.F.** Scanning—Tunneling—Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid [Текст] / H.F. Hess, R.B. Robinson, R.C. Dynes, J.M. Valles, J.V. Waszczak // Phys. Rev. Lett. – 1989. – Vol. 62. – P. 214.

[25]. **Hess, H.F.** Vortex—core structure observed with a scanning tunneling microscope [Текст] / H.F. Hess, R.B. Robinson, J.V. Waszczak // Phys. Rev. Lett. – 1990. – Vol. 64. – P. 2711.

[26]. **Hoogenboom, B.W.** Shape and motion of vortex cores in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  [Текст] / B.W. Hoogenboom, M. Kugler, B. Revaz, I. Maggio— Aprile, O. Fischer, Ch. Renner // Phys. Rev. B – 2000. – Vol. 62. – P. 9179.

[27]. **Г.С. Мкртчян, Г.С.** / Г.С. Мкртчян, В.В. ШМИДТ // ЖЭТФ – 1971. – Т. 61. – С. 367.

[28]. **Thuneberg, E.V.** Pinning of a Vortex Line to a Small Defect in Superconductors [Текст] / E.V. Thuneberg, J. Kurkijarvi, D. Rainer // Phys. Rev. Lett – 1982. – Vol. 48. – P. 1853.

[29]. **Larkin, A.I.** Resistance of layered superclean superconductors at low temperatures [Текст] / A.I. Larkin, Yu.N. Ovchinnikov // Phys. Rev. B – 1998. – Vol. 57. – P. 5457.

[30]. **Копнин, N.B.** Theory of Nonequilibrium Superconductivity [Текст] / N.B. Kopnin // International Series of Monographs on Physics – 2001. – Vol. 110. — Oxford University Press, New—York.

[31]. **Tarkhov, M.** Ultrafast reset time of superconducting single photon detectors [Текст] / Tarkhov, M., Claudon, J., Poizat, J.Ph., Korneev, A., Divochiy, A., Minaeva, O., Seleznev, V., Gol'tsman, G. // Appl. Phys. Lett – 2008 – V. 92 – N. 241112.

[32]. **Divochiy, A.** Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths [Текст] / Divochiy, A., Marsili, F., Bitauld, D., Gaggero, A., Leoni, R., Mattioli, F., Korneev, A., Fiore, A. // Nature Photonics – 2008 – V.2- P.302.

- [33]. **Ивлев, Б.И.** Теория токовых состояний в узких сверхпроводящих каналах [Текст] / Б.И. Ивлев, Н.Б. Копнин // УФН – 1984.— Т.142— С. 435—471. — Библиогр.: с. 435.
- [34]. **Tidecks, R.** Current—induced nonequilibrium phenomena in quasi—one—dimensional superconductors [Текст] // Springer, Berlin, 1990.
- [35]. **Vodolazov, D.Y.** Current-Voltage Characteristics of Quasi-One-Dimensional Superconductors: An S-Shaped Curve in the Constant Voltage Regime [Текст] / D.Y. Vodolazov, F.M. Peeters, L. Piraux, S. Ma'efi-Tempfli, and S. Michotte // Phys. Rev. Lett. – 2003 – Vol. 91.- N.-157001.
- [36]. **Michotte, S.** Condition for the occurrence of phase slip centers in superconducting nanowires under applied current or voltage [Текст] / S. Michotte, L. Piraux, S. Matefi—Tempfli, D.Y. Vodolazov, F.M. Peeters // Phys. Rev. B — 2004 – Vol. 69.— N.—094512.
- [37]. **Watts-Tobin, R. J.** Nonequilibrium Theory of Dirty, Current-Carrying Superconductors: Phase-Slip Oscillators in Narrow Filaments Near  $T_c$  [Текст] / R. J. Watts-Tobin, Y. Krähenbühl, and L. Kramer // J. Low Temp. Phys. – 1981 – Vol. 42 – P. 459.
- [38]. **Vodolazov, D. Y.** Enhancement and decrease of critical current due to suppression of superconductivity by a magnetic field [Текст] / D. Y. Vodolazov, D. S. Golubović, F. M. Peeters, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B – 2007— Vol. 76—N. 134505.
- [39]. **Buzdin, A.I.** Domain—wall superconductivity in hybrid superconductor—ferromagnet structures [Текст] / A.I. Buzdin, A.S. Melnikov // Phys. Rev. B — 2003. — Vol. 67 — N. 1. — P.020503—1—020503—4.
- [40]. **Aladyshkin, A.Yu.** Domain—wall superconductivity in hybrid superconductor—ferromagnet structures [Текст] / A.Yu. Aladyshkin, A.I. Buzdin, A.A. Fraerman, A.S. Mel'nikov, D.A. Ryzhov, A.V. Sokolov // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 68. – N. 184508.
- [41]. **Rusanov, A. Yu.** Enhancement of the Superconducting Transition Temperature in Nb / Permalloy Bilayers by Controlling the Domain State of the Ferromagnet [Текст] / A.Yu. Rusanov, M. Hesselberth, J. Aarts, A. I. Buzdin // Phys. Rev. Lett — 2004. — Vol. 93. – N. 5. — P. 057002—1— 057002—4.
- [42]. **Yang, Z.** Domain—wall superconductivity in superconductor—ferromagnet hybrids [Текст] / Z. Yang, M. Lange, A. Volodin, R. Szymczak, V.V. Moshchalkov // Nat. Mater. – 2004. – Vol. 3. P. 793.
- [43]. **Golubovic, D.S.** Little—Parks effect in a superconducting loop with a magnetic dot [Текст] / D.S. Golubovic, W.V. Pogosov, M. Morelle, V.V. Moshchalkov // Phys. Rev. B – 2003. – Vol. 68. – P. 172503.

[44]. **Aladyshkin, A.Yu.** Influence of ferromagnetic nanoparticles on the critical current of Josephson junction [Текст] / A.Yu. Aladyshkin, S.A. Gusev, A.Y. Klimov, Y.N. Nozdrin, G.L. Pakhomov, V.V. Rogov, A.A. Fraerman, S.N. Vdovichev // Journ. Magn. Mater. — 2003. — Vol. 258—259. — P. 406—408.

[45]. **Самохвалов, А.В.** Максимальный сверхток джозефсоновского перехода в поле магнитных частиц [Текст] / А.В. Самохвалов // Письма в ЖЭТФ — 2003. — Т. 78. — Вып. 6. — С. 822—826.

[46]. **Fraerman, A.A.** Commensurability effects in overlap Josephson junctions coupled with a magnetic dots array [Текст] / A.A. Fraerman, S.A. Gusev, Yu.N. Nozdrin, A.V. Samokhvalov, and S.N. Vdovichev, L. Fritzsche, E. Il'ichev, R. Stolz // Phys. Rev. B — 2006. — Vol. 73 — N. 18. — P. 100503—1— 100503—4.

[47]. **Самохвалов, А.В.** Эффекты соизмеримости в туннельном джозефсоновском переходе в поле массива магнитных частиц [Текст] / А.В. Самохвалов // ЖЭТФ — 2007. — Т. 131. — Вып. 3. — С. 500—510.

[48]. **Majoros, M.** Transport ac losses and screening properties of Bi—2223 multifilamentary tapes covered with magnetic materials [Текст] / M. Majoros, B. A. Glowacki, A. M. Campbell // Physica C — 2000 — Vol. 338. — P. 251—256.

[49]. **Horvat, J.** Improvement of critical current in MgB<sub>2</sub> / Fe superconducting wires by a ferromagnetic sheath [Текст] / J. Horvat, X. L. Wang, S. Soltanian, S. X. Dou // Appl. Phys. Lett. — 2002 — Vol. 80. — P. 829—832.

[50]. **Alamgir, A. K. M.** Experiment of enhancing critical current in Bi—2223 / Ag tape by means of ferromagnetic shielding [Текст] / A. K. M. Alamgir, C. Gu, Z. Han // Physica C — 2005 — Vol. 432. — P. 153—158.

[51]. **Gomory, F.** Reduction of ac transport and magnetization loss of a high—T<sub>c</sub> superconducting tape by placing soft ferromagnetic materials at the edges [Текст] / F. Gomory, J. Souc, M. Vojenciak, A. K. Alamgir, Z. Han, Ch. Gu, // Appl. Phys. Lett. — 2007 — Vol. 90. — N. 092506.

[52]. **Vodolazov, D.Y.** Considerable enhancement of the critical current in a superconducting film by a magnetized magnetic strip [Текст] / D.Y. Vodolazov, B.A. Gribkov, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, Yu.N. Nozdrin, V.V. Rogov, S.N. Vdovichev // Phys. Rev. B. — 2005. — Vol. 72. — N. 064509.

[53]. **Vodolazov, D.Y.** Strong influence of a magnetic layer on the critical current of Nb bridge in finite magnetic fields due to surface barrier effect [Текст] / D.Y. Vodolazov, B.A. Gribkov, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, S.N. Vdovichev // Appl. Phys. Lett. — 2009. — Vol. 94. — N. 012508.

- [54]. **Ye, P.D.** Electrons in a Periodic Magnetic Field Induced by a Regular Array of Micromagnets [Текст] / P.D. Ye, D. Weiss, R.R. Gerhardts, M. Seeger, K. von Klitzing, K. Eberl, H. Nickel // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 74. – P. 3013.
- [55]. **Xue, D.P.** Magnetotransport properties of two—dimensional electron gases under a periodic magnetic field [Текст] / D.P. Xue, G. Xiao // Phys. Rev. B – 1992. – Vol. 45. – P. 5986. Deng Ping Xue and Gang Xiao, Phys. Rev. B 45, 5986 (1992).
- [56]. **Rammer, J.** Weak localization in inhomogeneous magnetic fields [Текст] / J. Rammer, A.L. Shelankov // Phys. Rev. B – 1987. – Vol. 36. – P. 3135.
- [57]. **Wang, X.—B.** Dephasing time of disordered two—dimensional electron gas in modulated magnetic fields [Текст] / X.—B. Wang // Phys. Rev. B – 2002. – Vol. 65. – P. 115303.
- [58]. **Aladyshkin, A.Yu.** Nucleation of superconductivity and vortex matter in superconductor—ferromagnet hybrids [Текст] / A.Yu. Aladyshkin, A.V. Silhanek, W. Gillijns, V.V. Moshchalkov // Supercond. Sci. Tech. – 2009. – Vol. 22. – N. 053001.
- [59]. **Genkin, G.M.** Magnetization of the ferromagnetic—superconductor structures [Текст] / G.M. Genkin, V.V. Skuzovatkin, I.D. Tokman // J. Magn. Mater. – 1994. – Vol. 130. – P. 51.
- [60]. **Genkin, G.M.** Nonuniform magnetization of a ferromagnet by the magnetic field of a superconducting vortex (as a problem of micromagnetism) [Текст] / G.M. Genkin, V.V. Skuzovatkin, I.D. Tokman // J. Magn. Mater. – 1995. – Vol. 149. – P. 345.
- [61]. **Беспятых, Ю.И.** Подавление доменной структуры в одноосных ферромагнитных пленках со сверхпроводящим покрытием [Текст] / Ю.И. Беспятых, В. Василевский, Э.Г. Локк, В.Д. Харитонов // ФТТ. – 1994. – Т. 40. – С. 1068.
- [62]. **Stankiewicz, A.** Magnetic domain structures of ferromagnetic ultra—thin films deposited on superconducting substrates [Текст] / A. Stankiewicz, V. Tarasenko, S.J. Robinson, G.A. Gehring // J. Phys.: Condens. Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. 1019.
- [63]. **Bulaevskii, L.N.** Ferromagnetic film on a superconducting substrate [Текст] / N. Bulaevskii, E.M. Chudnovsky // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 63. – P. 012502.
- [64]. **Sonin, E.B.** Comment on 'Ferromagnetic film on a superconducting substrate' [Текст] / E.B. Sonin // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – N. 136501.
- [65]. **Fraerman, A.A.** Magnetization reversal of a nanoscale ferromagnetic disk placed above a superconductor [Текст] / A.A. Fraerman, I.R. Karetnikova, I.M. Nefedov, I.A. Shereshevskii, M.A. Silaev // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 71. – N. 094416.



[66]. **Pokrovsky, V.L.** Magnetic configurations of hybrid ferromagnetic dot–superconductor systems [Текст] / V.L. Pokrovsky, K. Romanov, H. Wei // Journ. Magn. Mater. – 2006. – Vol. 307. – P. 107.

[67]. **Carneiro, G.** Tunable interactions between vortices and a magnetic dipole [Текст] / G. Carneiro // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – N. 144514.

[68]. **Carneiro, G.** Tunable critical current for a vortex pinned by a magnetic dipole [Текст] / G. Carneiro, // Europhys. Lett. – 2005. – Vol. 71. – P. 817.

[69]. **Carneiro, G.** Simple model for tunable vortex pinning by a magnetic dipole [Текст] / G. Carneiro. // Physica C. – 2006. – Vol. 437—438. – P. 42.

[70]. **Žutić, I.** Spintronics: Fundamentals and applications / I. Žutić, J. Fabian, and S. Das // Rev. Mod. Phys.- 2004.- V. 76.- P.323.

[71]. **Pratt, W.P.** Perpendicular giant magnetoresistances of Ag/Co multilayers / W.P. Pratt, Jr., S.-F. Lee, J.M. Slaughter, R. Loloee, P.A. Schroeder, and J. Bass / Phys. Rev. Lett.- 1991.- V. 66.- P. 3060.

[72]. **Moodera, J.S.** Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions / J. S. Moodera, Lisa R. Kinder, Terrilyn M. Wong, and R. Meservey // Phys. Rev. Lett.- 1995.- V.74.- P. 3273.

[73]. **Katine, J.A.** Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co /Cu /Co Pillars / J. A. Katine, F. J. Albert, R. A. Buhrman, E. B. Myers, and D. C. Ralph // Phys. Rev. Lett.- 2000.- V. 84.- P. 3149.

[74]. **Крикунов, А.И.** Оптический контроль процесса формирования барьерного диэлектрика в технологии изготовления спин-туннельных структур / А.И. Крикунов // Сборник трудов XX международной школы-семинара НМММ Москва - 2006 - С. 989-991.

[75]. **Фраерман, А.А.** Магнитосопротивление многослойных ферромагнитных наночастиц / Тезисы докладов XIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» Нижний Новгород - 2009 - Т. 1 - С. 52-53.

[76]. **Андронов, А.А.** / А.А. Андронов, П.П. Вышеславцев, В.В. Курин, И.М. Нефедов, А. А.Шерешевский // Изв. ВУЗов, Радиофизика — 1997— Т. XL(1-2) – С. 213—231.

[77]. **Sherehsevskii, I.A.** / I.A. Sherehsevskii // Journal of Nonlinear Mathematical Physics –2001. — Vol. 8. — P. 446.

[78]. **Шерешевский, И.А.** Алгоритмы и программы моделирования процессов в мезоскопических сверхпроводящих пленках/ И.А. Шерешевский, И.М. Нефедов, Д.А. Рыжов, А.Ю. Аладышкин // Тезисы докладов XIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника » Нижний Новгород – 2009 — Т. 2 — С. 551—552.

[79]. **Mironov, S.V.** Dephasing time and magnetoresistance of two-dimensional electron gas in spatially modulated magnetic fields [Текст] / A. S. Mel'nikov, S. V. Mironov, S. V. Sharov // Phys. Rev. B – 2010. – Vol. 81. — N. 115308.

[80]. **Каретникова, И.Р.** Пакет программ SIMMAG для моделирования задач микромагнетизма [Текст] / И.Р. Каретникова, И.М. Нефедов, И.А. Шерешевский // Тезисы докладов XII Международного симпозиума <Нанофизика и нанoeлектроника> Нижний Новгород – 2009 - Т. 2, С. 277-279.

[81]. **Каретникова, И.Р.** Неоднородные состояния и механизм перемагничивания цепочки классических диполей [Текст] / И.Р. Каретникова, И.М. Нефедов, М.В. Сапожников, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский // ФТТ – 2001 – Т. 43 – С. 2030-2034.

[82]. **Fraerman, A.A.** Numerical simulation of the dipole interaction effects in the lattices of ferromagnetic particles [Текст] / A.A. Fraerman, I.R. Karetnikova, I.M. Nefedov, M.V. Sapozhnikov, I.A. Shereshevskii // The Physics of Metal and Metallography – 2001 – V. 92 – P. S226-S230.

[83]. **Fraerman, A.A.** Magnetization reversal of a nanoscale ferromagnetic disk placed above a superconductor [Текст] / A.A. Fraerman, I.R. Karetnikova, I.M. Nefedov, I.A. Shereshevskii, M.A. Silaev [Текст] // Phys. Rev. B – 2005 - V. 71 – P. 0944161-0944167.

[84]. **Mironov, V.L.** MFM probe control of magnetic vortex chirality in elliptical Co nanoparticles [Текст] / V.L. Mironov, B.A. Gribkov, A.A. Fraerman, S.A. Gusev, S.N. Vdovichev, I.R. Karetnikova, I.M. Nefedov, I.A. Shereshevsky // JMMM – 2007 – V. 312 – P. 153-157.

[85]. **Нефедов, И.М.** Компьютерное моделирование МСМ изображений с учетом магнитостатического взаимодействия зонда и образца [Текст] / И.М. Нефедов, Б.А. Грибков, И.Р.Каретникова, В.Л. Миронов, А.А. Фраерман, И.А. Шерешевский // Тезисы докладов XIII Международного симпозиума <Нанофизика и нанoeлектроника> Нижний Новгород – 2009 - Т. 2, С. 498-499.

[86]. **Никитушкин, Д.С.** Магнитные состояния в многослойных ферромагнитных наночастицах [Текст] / Д.С. Никитушкин, А.А. Фраерман, В.Л. Миронов, И.М. Нефедов, И.Р. Каретникова, И.А. Шерешевский // Тезисы докладов X Международного симпозиума <Нанофизика и нанoeлектроника> Нижний Новгород – 2006 - Т. 2, С. 233-234.

[87]. **Mironov, V.L.** Antivortex state in crosslike nanomagnets [текст] / V.L. Mironov, O.L. Ermolaeva, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, B.A. Gribkov, O.G. Udalov, and A.A. Fraerman // Phys. Rev. B.- 2010.- Vol. 81.- P. 094436.

[88]. **Fraerman, A.A.** Diode effect in a medium with helical magnetic structure [текст] / A.A. Fraerman and O.G. Udalov // Phys. Rev. B.- 2008.- Vol. 77.- P. 094401.

[89]. **Караштин, Е.А.** Оптическая активности в средах с некопланарным распределением намагниченности [текст] / Е.А. Караштин, О.Г. Удалов, А.А. Фраерман, ЖЭТФ.- 2009.- Т. 136.- Вып. 6.- Стр. 1127.

[90]. **Koehler, W.C.** Magnetic Structures of Holmium. I. The Virgin State / W.C. Koehler, J.W. Cable, M.K. Wilkinson, and E.O. Wollan // Phys. Rev.- 1966.- V.151.- P.414.

[91]. **Grigoriev, S.V.** Magnetic structure of MnSi under an applied field probed by polarized small-angle neutron scattering / S.V. Grigoriev, S.V. Maleyev, A.I. Okorokov, Yu.O. Chetverikov, P. Böni, R. Georgii, D. Lamago, H. Eckerlebe, and K. Pranzas // Phys. Rev. B.- 2006.- Vol. 74.- P.214414.

[92]. **Fraerman, A.A.** Magnetic force microscopy of helical states in multilayer nanomagnets [текст] / A.A. Fraerman, B.A. Gribkov, S.A. Gusev, A.Yu. Klimov, V.L. Mironov, D.S. Nikitushkin, V.V. Rogov, S.N. Vdovichev, B. Hjorvarsson, and H. Zabel // Journal of Applied Physics.- 2008.- Vol. 103.- P. 073916.

[93]. **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 «Нанопизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта 2010, Т. 2. С. 594.

[94]. **Малютин, А.А.** Анализ применения объектива Шварцшильда в мягкой рентгеновской и ВУФ областях спектра. 1. Условия апланатизма пятого порядка //Квантовая электроника. – 1997. Т.24. – С. 93.

[95]. **Gower, M.** Photolithography microsteppers / M. Gower // [www.microlithographyworld.com](http://www.microlithographyworld.com). – 2004.

[96]. **Chkhalo, N.I.** A source of a reference spherical wave based on a single mode optical fiber with a narrowed exit aperture / N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, and M.N. Tоропов // Rev. Sci. Instrum. - 2008. - V.79. - P.033107.

[97]. **Клюенков, Е.Б.** Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью / Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Раскин, М.Н. Торопов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Российские нанотехнологии. - 2008. - Т.3.№9-10. - С.90-98.

[98]. **Клюенков, Е.Б.** Работы по созданию и аттестации рентгенооптических элементов и систем сверхвысокого разрешения в ИФМ РАН / Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2009. - Т.73.№1. - С.66-70.

[99]. **Chkhalo, N.I.** Manufacturing of XEUV mirrors with a sub-nanometer surface shape accuracy / N.I. Chkhalo, E.B. Kluev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.G. Raskin, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov and M.N. Toropov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2009. - V.603. Issues 1-2. - P. 62-65.

[100]. **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. - №1. - С. 1-7.

[101]. **Otaki, K.** Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror / K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda, K. Ota, I. Nishiyama, S. Okazaki // J. Vac. Sci. Technol. - 2002. - v.20.No.1. - P.295-300.

[102]. **Вознесенский, Н.Б.** Интерференционный контроль асферических компонентов объектива для нанолитографии / Н.Б. Вознесенский, Е.В. Гаврилов, А.П. Жевлаков, В.К. Кирилловский, П.В. Орлов // Журнал технической физики. - 2007. - Т.77.вып.2. - С.126-130.

[103]. **Пуряев, Д.Т.** Методы контроля оптических асферических поверхностей // М.: Машиностроение. - 1976. - С.13.

[104]. **Michaelsen, C.** Improved graded multilayer mirrors for XRD applications / C. Michaelsen, P. Ricardo, D. Anders, M. Schuster, J. Schilling, and H. Göbel // Adv. X-Ray Anal. -2000 – V.42 – P.308.

[105]. **Michaelsen, C.** Multilayer mirror for x rays below 190 eV / C. Michaelsen, J. Wiesmann, R. Bormann, C. Nowak, C. Dieker, S. Hollensteiner & W. Jager. // Opt. Lett. – 2001.- V. 26.- № 11 - P. 792-794.

[106]. **Зуев, С.Ю.** Многослойные дисперсионные элементы на основе В<sub>4</sub>С для спектральной области 6.7 - 8 нм /С.Ю. Зуев, Е.Б. Ключенков, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. - №1. - С 32-35.

[107]. **Ricardo, P.** Improved analyzer multilayers for aluminum and boron detection with x-ray fluorescence / P. Ricardo, J. Wiesmann, C. Nowak, C. Michaelsen, and R. Bormann // Appl. Opt. – 2001.- V.40.- P. 2747-2754.

[108]. **Andre, J.-M.** La/B<sub>4</sub>C multilayer interferential mirrors with small period for the soft x-ray range / J-M. Andre, Ph. Jonnard, E.O. Filatova, C. Michaelsen, J. Wiesmann, M.-F. Ravet, F. Bridou // Proceedings of the Workshop «X-ray Optics - 2004».- Institute of Physics for Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia – 2004.-P.242-246.

[109]. **Platonov, Yu.** Status of small d-spacing X-ray multilayer development at Osmic / Yu. Platonov, L. Gomez, D. Broadway // SPIE Proc. – 2002. - V. 4782.-P. 152-159.

[110]. **Andreev, S.S.** Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications / S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Kluev, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.Yu. Zuev // Central European Journal of Physics. CEJP – 2003. – N.1. – P.191–209.

[111]. **Bibishkin, M.S.** Apparatus and methods for investigations of multilayer mirrors in the 0.6-20 nm spectral range / M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, E.B. Klyuenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures. March 7-11 2004. Rusutsu Resort. Sapporo. Japan. – 2004. – P.02-07.

[112]. **Платонов, Ю.Я.** Рентгенооптические исследования характеристик многослойных структур / Ю.Я. Платонов, Н.И. Полушкин, Н.Н. Салащенко, А.А. Фраерман // ЖТФ. - 1987. -Т. 57. - С. 2192.

[113]. **Гусев, С.А.** Электронная микроскопия поперечных сколов многослойных зеркал Mo/Si /С.А. Гусев, Е.Н. Садова, К.А. Прохоров //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2000. - №1. – С.132-135

УТВЕРЖДАЮ

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

« 30 » апреля 2010 г.

## АКТ

### изготовления

вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива  
Государственный контракт от « 22 » марта 2010 г.  
Шифр «2010-1.1-121-011-002»

Комиссия в составе:

председатель	<i>Зав. отделом 160</i>	<i>Вакс Владимир Лейбович</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>н.с. отд. 150</i>	<i>Вдовичев Сергей Николаевич</i>

назначенная приказом Учреждения Российской Академии Наук Института физики микроструктур РАН 21 апреля 2010 г. № 4, провела приемочные испытания вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива (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**

Опытные образцы использовать для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм.

#### Приложения

A1 Комплект протоколов испытаний.

A2 Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

Члены комиссии

*В.Л. Вакс*

*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 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
1	Изготовление вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива.	<p>Методом ионно-пучкового травления и магнетронного напыления форма поверхности подложки вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм улучшена по параметру среднеквадратического отклонения от расчетной с 17,8 нм (исходная ошибка формы поверхности после стандартных оптических методов изготовления) до 0,89 нм, что обеспечивает качество волнового фронта, для получения пространственного разрешения объектива на уровне 30 нм в области 0,6x0,6 мм<sup>2</sup>. Методики коррекции обеспечивали сохранение микрошероховатости поверхности на уровне 0,3 нм, для обеспечения высокого коэффициента отражения многослойного рентгеновского зеркала (МРЗ) на основе пары материалов Mo/Si. Развитая технология с применением антидиффузионных слоев на границе раздела материалов позволила получить коэффициент отражения Mo/Si зеркал на длине волны 13,5 нм – 69%. Для компенсации</p>	Соответствует



		<p>упругих деформаций, приводящих к искажению формы поверхности зеркала, вызванных наличием внутренних напряжений в многослойной структуре Mo/Si, на подложку наносилось антистрессовое покрытие на основе пары материалов Cr/Sc имеющее противоположный знак внутренних напряжений. Таким образом изготовлено вогнутое асферическое зеркало для ЭУФ нанолитографа с субнанометровой точностью формы поверхности и высокотражающим многослойным покрытием, оптимизированным длину волны 13,5 нм.</p>	
--	--	--	--

## Протокол испытаний вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива

1. Наименование организации, проводящей испытание: Учреждение Российской Академии Наук Институте физики микроструктур РАН
2. Заказчик: Институт физики микроструктур РАН
3. Дата испытаний: 16.04.2010 г.
4. Наименование опытного образца: вогнутое асферическое зеркало для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм
5. Методы испытания:
  - а. Аттестация формы поверхности при помощи интерферометра с дифракционной волной сравнения
  - б. Определение микрошероховатости поверхности атомно-силовой микроскопией
  - в. Определение коэффициентов отражения многослойных отражающих покрытий методом ЭУФ рефлектометрии.
6. Описание образца: Вогнутое асферическое зеркало: диаметр  $D=220$  мм, радиус ближайшей сферы  $R=380$  мм, максимальное отклонение от сферы  $\Delta=6,57$  мкм, числовая апертура  $NA=0,3$ , многослойное отражающее покрытие, оптимизированное на длину волны 13,5 нм, на основе пары материалов Mo/Si.
7. Зеркало вклеено в металлическую оправу.
8. Результаты испытаний:

Карта поверхности скорректированной подложки до нанесения многослойного отражающего покрытия, полученная методом атомно-силовой микроскопии представлена на рис.23. Среднеквадратическая высота микрошероховатости поверхности составила  $\sigma=0,3$  нм.

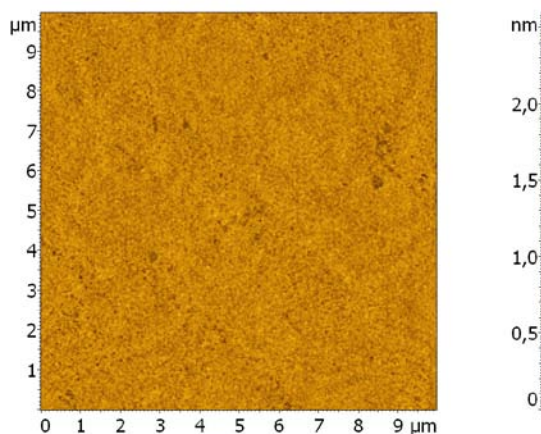


Рисунок 23 - Карта поверхности вогнутого асферического зеркала проекционного объектива ЭУФ нанолитографа до нанесения МСС Mo/Si. АФМ кадр 10x10 мкм, микроскоп Solver Pro (NT-MDT).

Карта отклонения формы поверхности от расчетной приведена на рис.24, среднеквадратическое отклонение составляет  $RMS=0,89$  нм.

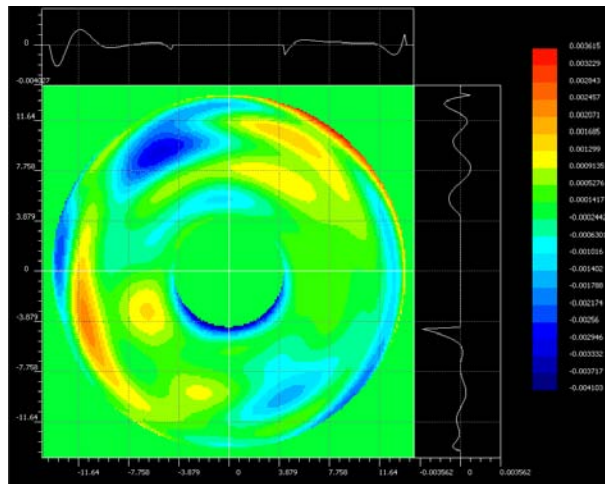


Рисунок 24 - Карта отклонения формы поверхности вогнутого асферического зеркала проекционного объектива ЭУФ нанолитографа от расчетных параметров. Карта получена на интерферометре с дифракционной волной сравнения.

На рисунке 25 представлены кривые отражения рентгеновского излучения в окрестности длины волны 13,5 нм (Si L $\alpha$  линия) от вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа, коэффициент отражения при нормальном падении ( $\theta_{\text{макс}}=85^\circ$ ) составляет 67%.

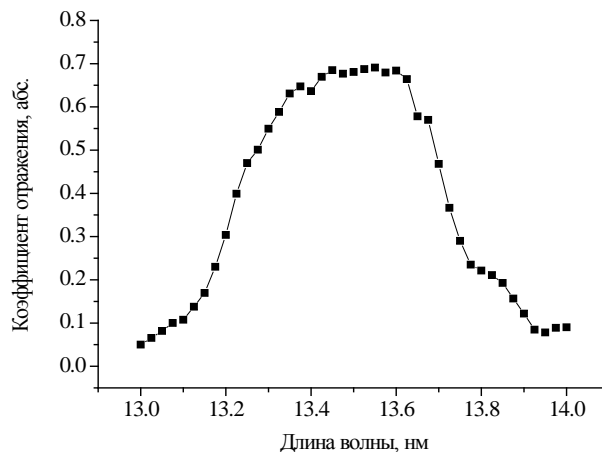


Рисунок 25 - Спектральная зависимость коэффициента отражения излучения с длиной волны 13,5 нм (Si L $\alpha$  линия) от вогнутого асферического зеркала проекционного объектива ЭУФ нанолитографа, снятое на ЭУФ рефлектометре на основе рентгеновского спектрометра монохроматора РСМ-500.

- Испытания, проведенные с привлечением научно-исследовательского оборудования ИФМ РАН, показали возможность применения вогнутого асферического зеркала с многослойным отражающим покрытием на основе пары материалов Mo/Si в качестве зеркала для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм с расчетным пространственным разрешением 30 нм в области 0,6x0,6 мм<sup>2</sup>.

Испытания провел:

н.с. отд. №130

Пестов А.Е

УТВЕРЖДАЮ

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

«30» апреля 2010 г.

## АКТ

### изготовления

La/V<sub>4</sub>C многослойных структур с антидиффузионными слоями  
Государственный контракт от «\_22\_» марта 2010 г.  
Шифр «2010-1.1-121-011-002»

Комиссия в составе:

председатель	<i>Зав. отделом 160</i>	<i>Вакс Владимир Лейбович</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>н.с. отд. 150</i>	<i>Вдовичев Сергей Николаевич</i>

назначенная приказом Учреждения Российской Академии Наук Института физики микроструктур РАН 26 апреля 2010 г. № 5, провела приемочные испытания вогнутого асферического зеркала для проекционного объектива (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

Опытные образцы использовать для изучения физики роста и процессов межслойной диффузии в La/B<sub>4</sub>C многослойных структурах.

#### Приложения

**Б1** Комплект протоколов испытаний.

**Б2** Ведомость соответствия результатов испытаний требованиям ТЗ.

Члены комиссии

*В.Л. Вакс*

*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 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
1	Синтез и изучение отражательных характеристик и структурных параметров La/B <sub>4</sub> C многослойных структур с антидиффузионными слоями	Многослойные структуры La/B <sub>4</sub> C изготавливались методом магнетронного напыления на суперполированные пластины кремния со среднеквадратичной высотой микронеровностей ≈ 0,3 нм. Изучение коэффициентов отражения на длине волны 6,69 нм при нормальных углах падения показали значительное (на 20 – 30%) отличие теоретических значений от экспериментальных. По данным рентгеновской дифракции, причиной наблюдаемого расхождения между расчетными и экспериментально полученными значениями коэффициентов отражения в мягком рентгеновском диапазоне является химическое взаимодействие между La и B, приводящее к образованию протяженных переходных областей разной ширины на гетерограницах. С целью затруднения взаимного проникновения La и B применялись буферные слои. В качестве материалов для них были выбраны Cr, Mo и Sn, известные своей	Соответствует

		<p>низкой химической активностью и малым поглощением в окрестности <math>\lambda = 6,7</math> нм. Однако использование барьерных антидиффузионных слоев Cr, Mo и Sn с толщинами 0,3 – 0,5 нм не привело к улучшению отражательных характеристик описанных МС. Увеличение толщины барьерных слоев не имеет смысла, поскольку в оптимизированных на максимум коэффициента отражения МСС нормального падения La/V<sub>4</sub>C толщина слоя La составляет около 1,5 нм. Одним из возможных решений данной проблемы является замена в La/V<sub>4</sub>C МСС слоя La его стабильным химическим соединением с удовлетворительными рентгенооптическими характеристиками в окрестности длины волны 6,7 нм. Предварительные расчеты указывают на перспективность такого подхода.</p>	
--	--	---	--

## Протокол испытаний La/V<sub>4</sub>C многослойных структур

10. Наименование организации, проводящей испытание: Учреждение Российской Академии Наук Институте физики микроструктур РАН
11. Заказчик: Институт физики микроструктур РАН
12. Дата испытаний: 05.04.2010 г.
13. Наименование опытных образцов: многослойные структуры на основе пары материалов La и V<sub>4</sub>C
14. Методы испытания:
  - а. Изучение отражательных характеристик методом МР рефлектометрии (длина волны 6,7 нм)
  - б. Изучение отражательных характеристик методом малоугловой рентгеновской рефлектометрии (длина волны 0,154 нм)
  - в. Исследование срезов зеркал методом высокоразрешающей электронной микроскопии
15. Описание образцов: многослойная структура на основе пары материалов La и V<sub>4</sub>C, в том числе с антидиффузионными прослойками из Cr, Mo и Sn, нанесенная на плоскую кремниевую подложку.
16. Результаты испытаний:

Характерные параметры отражения МСС, предназначенных для работы вблизи нормали на длине волны 6,69 нм (В K $\alpha$  линия) на рисунке 26. Коэффициенты отражения с применением антидиффузионных слоев достигают 40%.

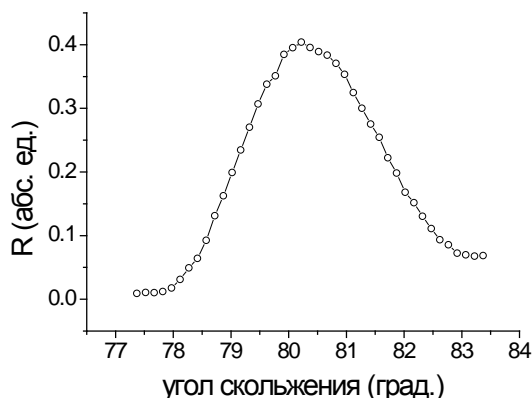


Рисунок 26 - Угловая зависимость коэффициента отражения излучения с длиной волны 6,69 нм (В K $\alpha$  линия) от МСС на основе пары материалов La/V<sub>4</sub>C, снятое на ЭУФ рефлектометре на основе рентгеновского спектрометра монохроматора РСМ-500.

Для изучения внутреннего строения синтезированных МСС проводились исследования отражения структур на длине волны Cu (K $\alpha$ )  $\lambda = 0,154$  нм. При этом в зависимости от периода МСС в отражательной характеристике можно увидеть до 6-7 ( $d \approx 7$  нм) дифракционных пиков, анализ которых позволяет получить информацию о структуре МСС. Характерные кривые отражения представлены на рисунке 27.



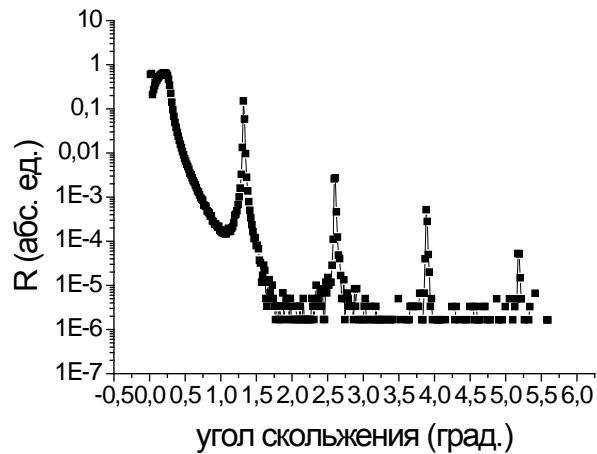


Рисунок 27 - Угловая зависимость коэффициента отражения излучения с длиной волны 0,154 нм (Cu K $\alpha$  линия) от МСС на основе пары материалов La/B $_4$ C, снятая на дифрактометре PANanalytical X'Pert Pro.

Исследования срезов МСС на просвет проводились на электронном микроскопе JEM 2000 EX в режиме высокого разрешения при ускоряющем напряжении 100 кВ. На рис. 28(a) приведена электронограмма МСС La/B $_4$ C с периодом 3,4 нм, демонстрирующая серию дифракционных пиков дифрагированных электронов, что говорит о высокой периодичности структуры. Отсутствие четких рефлексов от кристаллических решеток La и B $_4$ C может свидетельствовать об аморфоподобном состоянии слоев этих материалов. В изображении также видны дифракционные максимумы, соответствующие кремниевой подложке. Типичная фотография среза La/B $_4$ C, приведенная на рис. 28(b), подтверждает высокое качество напыленных слоев и позволяет сделать вывод о сохранении сплошности пленок в различных слоях МСС.

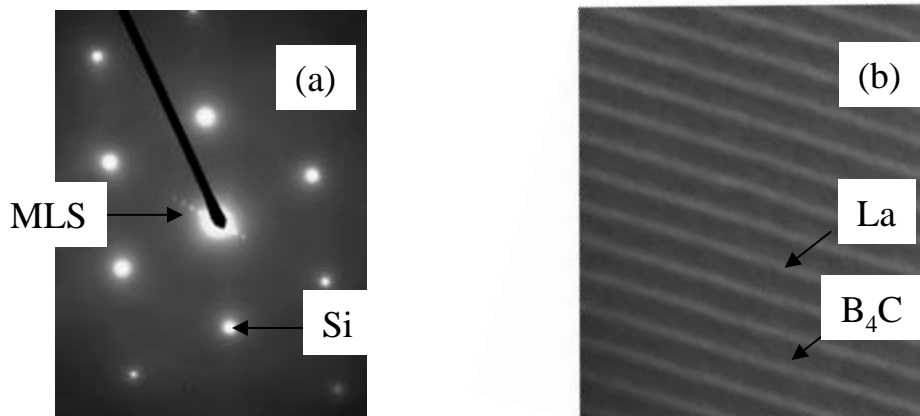


Рисунок 28 - Электронно-микроскопическое исследование МСС La/B $_4$ C: а) электронограмма, б) изображение среза.

8. Испытания, проведенные на базе Института физики микроструктур РАН, показали наличие значительных успехов в создании и изучении внутреннего строения многослойных структур на основе пары материалов La/B $_4$ C. Изучены влияния барьерных слоев на основе Cr, Mo и Sn на перемешивание материалов МСС, получены пиковые коэффициенты отражения в окрестности аномальной дисперсии бора, достигающие 40%.

Испытания провела:

н.с. отд. №130

Барышева М.М

**Приложение Г. Отчет о патентных исследованиях**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР**

**УДК 681.7.02  
621.384.4**

**ГК № 02.740.11.0540**

**«Утверждаю»**  
Директор ИФМ РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_/З.Ф. Красильник/  
"30" апреля 2010 г.

**ОТЧЕТ  
О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

по теме:

**АСФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА**

**ПОИСК ПАТЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

(промежуточный этап)

**Государственный контракт № 02.740.11.0540**

Руководитель Госконтракта  
академик, советник РАН

\_\_\_\_\_/С. В. Гапонов  
подпись, дата

Нижний Новгород 2010

## Список исполнителей

**Руководитель проекта:**

академик, советник РАН

С. В. Гапонов

**Исполнители:**

Зав. лаборатории 132, д.ф.-м.н.

Н.И. Чхало

Н.с., к.ф.-м.н.

А.Е. Пестов

М.н.с.

В.Н. Полковников

## Содержание

Общие данные об объекте исследования «Асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива»	92
Результаты анализа поиска патентной информации	93
Заключение	95
Приложение 1. Задание на проведение патентных исследований	96
Приложение 2. Регламент поиска	97
Приложение 3. Отчет о поиске	99

## Общие данные об объекте исследования

### *Назначение, область применения, краткое описание объекта*

Объектом исследования являются: асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм, обеспечивающего расчетное пространственное разрешение на уровне 30 нм в области 0,6x0,6 мм<sup>2</sup>.

Проекционная ЭУФ-литография на длине волны  $\lambda=13.5$  нм рассматривается как наиболее рентабельная для массового изготовления современных интегральных схем. И хотя есть еще ряд не решенных технических проблем, ожидается, что по этой технологии начнется производство микросхем с минимальными размерами элементов 22 нм в течение следующих трех лет (2012-2013 гг). В перспективе размеры элементов могут быть уменьшены до 10 нм, а при дальнейшем уменьшении рабочей длины волны излучения до  $\lambda=6.7$  нм – и до 8 нм.

Простейшим зеркальным объективом является двухзеркальная схема Шварцшильда, образованная выпуклым и вогнутым сферическими зеркалами. При правильном выборе радиусов зеркал и расстояний между элементами схемы удается скомпенсировать aberrации вплоть до пятого порядка при высоких числовых апертурах объектива. Однако такая схема обладает малым полем зрения, что отрицательно сказывается на ее эффективности для целей проекционной литографии. Для расширения поля зрения двухзеркального объектива необходимо применять асферические зеркала.

Для обеспечения дифракционного разрешения соответственно с критерием Марешала волновые деформации, вносимые объективом, не должны превышать 1 нм. Таким образом, значительное внимание уделяется созданию оптических элементов с субнанометровой точностью формы и нанесению бесстрессовых многослойных отражающих покрытий с градиентным распределением периода по поверхности.

Настоящее патентное исследование направлено на определение технического уровня и патентной ситуации относительно объекта, исследуемого в рамках выполнения данного Госконтракта.

## **Результаты анализа поиска патентной информации по теме “асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива”**

Патентный поиск проводился по ключевым словам и рубрикам МПК по странам: США, Россия, Япония, Китай, странам Европейского Сообщества.

При проведении патентного поиска использовались Web-сайты патентных ведомств стран поиска, а также патентный фонд Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ.

Просмотрено всего более 400 патентных документов, детально проанализировано около 15 патентных документов.

В результате проведенного исследования патентной ситуации по тематике “асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива” и схожими с ней установлено:

1. Большинство заявок по данной тематике и схожими с ней подано и/или опубликовано, начиная с 1998-2000 годов. На этот промежуток времени приходится и наибольшее количество заявок. Значительный рост наблюдается и в последнее время.

2. Лидирующее положение по числу патентов по данной тематике занимает Япония. Однако в настоящее время все более активную роль начинают играть страны Западной Европы (особенно Германия и Голландия), США и Канада. По данным проведенного поиска число международных патентов, принадлежащих Российским организациям, сравнительно невелико и начали они появляться лишь в последние годы 2006-2008 гг.

3. Научные исследования, проводимые в рамках данного Госконтракта, направлены на создание оптических элементов проекционного объектива ЭУФ нанолитографа на длину волны 13,5 нм. Создание которых позволит получить пространственное разрешение на уровне 30 нм в области 0,6x0,6 мм<sup>2</sup>.

Проведенный патентный поиск показывает, что большое количество работ, связанных со сходной тематикой, направлено, на

- создание оптической проекционной схемы литографической установки и рентгеновских микроскопов высокого разрешения: многозеркальные (число элементов от 2-х до 8-ми), осевые и внеосевые схемы
- создание распределения периода многослойной структуры по поверхности зеркал для обеспечения выполнения условия Брега по всей поверхности зеркала

- расчет числовой апертуры зеркала, обеспечивающей необходимое пространственное разрешение и светосилу
- коррекцию формы поверхности зеркала для исправления волновых деформаций

Большое количество таких работ (опубликованных патентов, а также научных статей в ведущих научных журналах, таких, как, например, “Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A”, “Physical Review Letters”, “Physical Review”, “SPIE Conference Proceedings” и других) свидетельствует как о понимании важности указанных проблем мировым сообществом, так и о чрезвычайной актуальности работ, выполняемых по данному Госконтракту.

4. Результаты проведенного поиска свидетельствуют о наличии нескольких групп тематически близких патентов, которые могут быть признаны наиболее близкими по одному или нескольким параметрам, таким как цели работы, принципы и задачи создания оптических элементов с нанометровой точностью формы, высокими коэффициентами отражения многослойных покрытий на рабочей длине волны с градиентным распределением периода по поверхности, к работам, выполняемым в рамках данного Госконтракта.

К первой группе патентов относятся многочисленные работы, в которых зеркала применяются в патентуемых рентгенооптических проекционных схемах литографических станков или микроскопов высокого разрешения. Эти работы направлены на создание эффективных многозеркальных оптических систем, обеспечивающих перенос рисунка из плоскости объекта в плоскость изображения. Число зеркал в работах варьируется от двух до восьми.

Вторая группа работ направлена на расчет формы поверхностей изображающей оптики, обеспечивающей дифракционное разрешение оптической системы, увеличение поля зрения за счет применения асферических зеркал.

К третьей группе можно отнести патенты направленные на создание отражающих поверхностей с высокой точностью формы. В работах обращается внимание на обеспечение минимальных волновых деформаций вносимых оптическими элементами, входящими в системы, после нанесения многослойных отражающих покрытий.

Совершенно неохваченным в литературе остается вопрос о нелинейных оптических свойствах нанокompозитов с ферромагнитными включениями. На наш взгляд эта область может сулить неожиданные применения.

## **Заключение**

На первом этапе патентных исследований проведен поиск патентных документов с целью определения технического уровня и патентной ситуации относительно результатов, полученных в ходе выполнения Госконтракта по теме “асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива”. Для последующего анализа отобрано и проанализировано около 15 патентных документов. Определены наиболее близкие аналоги к тематике данного Госконтракта. Проведенный на данном этапе поиск позволит на следующем этапе патентных исследований определить патентоспособность и патентную чистоту объектов, разрабатываемых в рамках выполняемого нами Госконтракта и всех последующих научно-исследовательских работ в данном направлении.



## Приложение В1

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института физики  
микроструктур РАН, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_/З.Ф. Красильник/

" 30 " апреля 2010 г.

### ЗАДАНИЕ

на проведение патентных исследований

**Наименование НИР «асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива»**

**Гос. контракт № 02.740.11.0540**

**Этап работы: 1**

**Сроки выполнения: 22.03 –15.05.2010**

**Задачи патентных исследований:** Патентный поиск с целью исследования технического уровня и патентоспособности разработанных в ходе выполнения вышеуказанной НИР асферических (выпуклой и вогнутой формы) зеркал для проекционного объектива.

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. (начало, окончание).	Отчетные документы
1	2	3	3	4
Поиск и анализ патентной информации	Отдел № 130	Заведующий лаб. №132, Н.И. Чхало  н.с. отд.130 А.Е. Пестов	<b>22.03.2010 – 30.04.2010</b>	Отчет о патентных исследованиях

Зав. лабораторией 132, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Н.И. Чхало

Н.с. отд. 130, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

А.Е. Пестов

## Приложение В2

### РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА

**Наименование работы (темы): «Асферические (выпуклой и вогнутой формы) зеркала для проекционного объектива»**

**Государственный контракт № 02.740.11.0540**

**Дата утверждения задания:** 22 марта 2010 г.

**Цель поиска информации:** исследование технического уровня и патентоспособности разработанных в ходе выполнения вышеуказанной НИР асферических (выпуклой и вогнутой формы) зеркал для проекционного объектива.

**Обоснование регламента поиска:** Патентный поиск проводится с использованием патентно-информационных баз данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС) и патентно-информационных баз данных United States Patent and Trademark Office (USPTO) и Европейских патентов (*esp@cenet*® database) по классам международной патентной классификации изобретений (МПК), а также с использованием источников информации, указанных в таблице.

**Начало поиска** 22.03.2010 г.,

**окончание поиска** 26.04.2010г.

Предмет поиска (объект исследования, его составные части).	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск		Ретроспективность	Наименование информационной базы (фонда)
		Патентные	НТИ		

		Наименование	Классификационные рубрики: МПК (МКИ), МКПО, НКИ и др.	Наименование	Рубрики УДК и другие		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Оптические композитные материалы на основе металлических и ферромагнитных наночастиц.</b>	Россия, США, Страны Европейского Сообщества, Япония, Канада, Китай	WEB-сайты Патентных Ведомств стран поиска  Официальные бюллетени Патентных Ведомств стран поиска. Бюл. "Изобретения стран мира" Кассеты ВИПТБ	<b>МПК 7 и 8 редакции:</b> B82B 1/00, B82B 3/00, G02B 1/10, G02B 5/08, G02B 21/02, G02B 27/18, G02B 17/06, G02B 13/14, G21K 7/00, G02B 17/00  <b>НКИ США:</b> 359/350, 359/359, 359/648, 359/649, 977/847, 977/856, 977/857, 359/838, 73/105, 378/62, 359/661, 359/366, 359/859, 378/34	Российские журналы: «ЖЭТФ», «ЖТФ», «Письма в ЖТФ», «Письма в ЖЭТФ»; международные: «Physical Review», «Physical Review Letters», « Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B», «SPIE Conference Proceedings», «Applied Physics Letters»	<b>535-32</b> <b>535.313.2</b> <b>531.717.81</b> <b>681.7-1/-9</b>	20 лет	<b>Патентный фонд ФИПС, Реферативная БД: RUABRU. Полнотекстовые БД: USPTO; ESP@CENET. Патентный фонд Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ВИПТБ).</b> Поисковые системы общего назначения (google, yandex) и специализированные ( <a href="http://www.patentstorm.us">www.patentstorm.us</a> ) ( <a href="http://www.uspto.gov">www.uspto.gov</a> )

Заведующий лаб. №132

Н.с. отд. 130

\_\_\_\_\_ Н.И. Чхало

\_\_\_\_\_ А.Е. Пестов

## Приложение В3

### ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

1. Поиск проведен в соответствии с Заданием, утвержденным директором Института физики микроструктур РАН, д.ф.-м.н. З.Ф. Красильником от 22.03.2010 и Регламентом поиска от 22.03.2010 г.
2. Этапы работы - 1
3. Начало поиска 22.03.2010 г. Окончание поиска 26.04.2010 г.
4. Сведения о выполнении регламента поиска: поиск проведен в полном соответствии с Регламентом.
5. Для последующего анализа отобрано 15 патентных документа. Всего в ходе поиска проанализировано более 400 патентных документов.

Таблица 1. Патентная документация

<b>Предмет поиска (объект исследования, его составные части)</b>	<b>Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс</b>	<b>Заявитель (патентообладатель), страна Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации</b>	<b>Название изобретения (полезной модели)</b>	<b>Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
вогнутое / выпуклое асферическое зеркало для проекционного объектива	Патент RU 2296353 C1 МПК G02B17/06 Публ. 27.03.2007	Изобретатель: Руденчик Е.А., Волкомирская Л.Б. Патентообладатель: Закрытое акционерное общество "Таймер" (RU) Заявка: 2005141216/28, 29.12.2005	Зеркальный объектив	

	<p>Патент RU 2277717 C1 МКП G02B9/16, G02B13/14 Публ. 10.06.2006</p>	<p>Изобретатель: Юхимец П.Ф., Гришина Л.И., Бездидько С.Н. Патентообладатель: Открытое акционерное общество "Красногорский завод им. С.А. Зверева" (RU) Заявка: 2004136633/28, 16.12.2004</p>	<p>Проекционный объектив для инфракрасной области спектра</p>	
	<p>Патент US 7199922 НК США 359/366, 378/34, 359/857, 359/365 МПК G02B17/00; G21K5/00 Публ. 03.04.2007</p>	<p>Изобретатель: Mann, Hans- juergen (Oberkochen, DE) Ulrich, Wilhelm (Aalen, DE) Hudyma, Russell M. (San Ramon, CA, US) Заявитель: Carl Zeiss SMT AG (Oberkochen, DE) Заявка: US 11/183877,19.07.2005</p>	<p>Reflective projection lens for EUV-photolithography</p>	
	<p>Патент US 6142641 НК США 359/859, 359/731 МПК G01B11/24; G01B11/255; G01M11/00; G02B17/06; G03F7/20; G02B17/00; G02B5/10 Публ. 18.04.1995</p>	<p>Изобретатель: Cohen, Simon J. (Pleasanton, CA) Jeong, Hwan J. (Los Altos, CA) Shafer, David R. (Fairfield, CT) Заявитель: Ultratech Stepper, Inc. (San Jose, CA) The Regents of the University of California (Oakland, CA)</p>	<p>Four-mirror extreme ultraviolet (EUV) lithography projection system</p>	

	<p>Патент US 6522716          НК США 378/34, 378/35,          378/85, 378/84          МПК G03F7/20; G21K1/06;          G21K1/00; G21K5/00          Публ. 18.02.2003</p>	<p>Изобретатель: Murakami,          Katsuhiko (Sagamihara, JP)          Ichihara, Yutaka (Yokohama, JP)          Заявитель: Nikon Corporation          (Tokyo, JP)          Заявка: US 09/684873,          06.10.2000</p>	<p>Multilayer-film reflective          mirrors, extreme UV          microlithography apparatus          comprising same, and          microelectronic-device          manufacturing methods utilizing          same</p>	
	<p>Патент US 6072852          НК США 378/34, 359/366,          250/492.200, 359/359          МПК H01S 3/109 ; H03S 3/10          Публ. 28.11.1989</p>	<p>Изобретатель: Hudyma, Russell          M. (San Ramon, CA)          Заявитель: The Regents of the          University of California (Oakland,          CA)          Заявка: US 09/094392,06.06.2000</p>	<p>High numerical aperture          projection system for extreme          ultraviolet projection lithography</p>	
	<p>Патент US 7268855          НК США 355/67, 355/66,          359/857, 359/850, 355/53          МПК G03B27/54;          G03B27/42; G03B27/70;          G02B5/08          Публ. 11.09.2007</p>	<p>Изобретатель: Sasaki, Takahiro          (Utsunomiya, JP) Susuki,          Masayuki (Utsunomiya, JP)          Заявитель: Canon Kabushiki          Kaisha (Ohta-ku, Tokyo, JP)          Заявка: 10/827968, 20.04.2004</p>	<p>Projection optical system</p>	
	<p>Патент US 7311407          НК США 359/846, 359/900,          359/359          МПК G02B5/08; G02B7/182          Публ. 25.12.2007</p>	<p>Изобретатель: Yamamoto,          Takeshi (Fujisawa, JP)          Miyake, Akira (Tochigi-ken, JP)          Заявитель: Canon Kabushiki          Kaisha (Ohta-ku, Tokyo, JP)          Заявка: 11/113113, 22.04.2005</p>	<p>Mirror unit, method of          producing the same, and          exposure apparatus and method          using the mirror unit</p>	

	<p>Патент US 7177076          НК США 359/365, 359/366,          378/34, 355/71, 359/857          МПК G02B17/00; G21K5/00;          G03B27/72          Публ. 13.02.2007</p>	<p>Изобретатель: Mann, Hans-jürgen          (Oberkochen, DE) Ulrich,          Wilhelm (Aalen-Dewangen, DE)          Seitz, Günther (Spiegelberg, DE)          Заявитель: Carl Zeiss SMT AG          (Oberkochen, DE)          Заявка: 10/418515, 18.04.2003</p>	<p>8-mirror microlithography          projection objective</p>	
	<p>Патент US 5911858          НК США 204/192.270          204/192.130, 204/192.150,          204/192.230          МПК C23C14/04; C23C14/54;          C23C14/56; G02B1/10;          G03F7/20; C23C14/34          Публ. 15.06.1999</p>	<p>Изобретатель: Ruffner, Judith          Alison (Albuquerque, NM)          Заявитель: Sandia Corporation          (Albuquerque, NM)          Заявка: 08/801883, 18.02.1997</p>	<p>Method for high-precision multi-          layered thin film deposition for          deep and extreme ultraviolet          mirrors</p>	
	<p>Патент US 6226346          НК США 378/34          МПК G02B17/06; G03F7/20;          G02B17/00; G21K5/00          Публ. 01.05.2001</p>	<p>Изобретатель: Hudyma, Russell          M. (San Ramon, CA)          Заявитель: he Regents of the          University of California (Oakland,          CA)          Заявка: 09/094420, 09.06.1998</p>	<p>Reflective optical imaging          systems with balanced distortion</p>	
	<p>Патент US 6285497          НК США 359/351, 359/859,          359/858, 378/34, 359/572,          359/900, 359/570, 355/67          МПК G03F7/20; G02B5/08;          G03B27/54; G02B5/10;          G02B5/18; G21K5/00          Публ. 04.09.2001</p>	<p>Изобретатель: Sweatt, William C.          (Albuquerque, NM) Ray-          chaudhuri, Avijit (Livermore, CA)          Заявка: 09/615795, 13.07.2000</p>	<p>Diffractive element in extreme-          UV lithography condenser</p>	

**Приложение Г. Отчет о патентных исследованиях**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР**

**УДК 535-34**

**621.793.164**

**ГК № 02.740.11.0540**

**«Утверждаю»**  
Директор ИФМ РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_/З.Ф. Красильник/  
"30" апреля 2010 г.

**ОТЧЕТ  
О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

по теме:

**ЛАНТАН-БОРСОДЕРЖАЩИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ  
СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ БОРА ( $\lambda \approx 6,7$  нм)**

**ПОИСК ПАТЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

(промежуточный этап)

Государственный контракт № 02.740.11.0540

Руководитель Госконтракта  
академик, советник РАН

\_\_\_\_\_/С. В. Гапонов  
подпись, дата

Нижний Новгород 2010



## Список исполнителей

**Руководитель проекта:**

академик, советник РАН

С. В. Гапонов

**Исполнители:**

Зав. лаборатории 132, д.ф.-м.н.

Н.И. Чхало

Н.с., к.ф.-м.н.

А.Е. Пестов

М.н.с.

В.Н. Полковников

## Содержание

Общие данные об объекте исследования «Лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$ нм)»	106
Результаты анализа поиска патентной информации	107
Заключение	108
Приложение 1. Задание на проведение патентных исследований	109
Приложение 2. Регламент поиска	110
Приложение 3. Отчет о поиске	112

## Общие данные об объекте исследования

### *Назначение, область применения, краткое описание объекта*

Объектом исследования являются лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$  нм).

Во многом интерес к многослойным зеркалам, предназначенным для работы на длине волны 6,7 нм, связан с развитием рентгеновских методов анализа содержания бора в легированных полупроводниках, диагностики плазмы и астрономии. Пристальное внимание в последнее время уделяется также проблеме создания оборудования для проекционной литографии с пространственным разрешением лучше 40 нм. В настоящее время российские и зарубежные научные центры сосредоточили основное внимание на разработке и изготовлении литографического оборудования для длины волны  $\lambda = 13,5$  нм. Здесь достигнут заметный прогресс в создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения. Разработаны и изготовлены первые образцы нанолитографов, обеспечивающих формирование на пластинках с фоторезистом элементов с минимальным размером 30 нм. Просматриваются пути достижения разрешения на уровне 16-20 нм. Однако, из-за ограничений на числовую апертуру оптики ( $NA < 0,5$ ), дальнейшая миниатюризация требует появления многослойной оптики, эффективно отражающей рентгеновское излучение с меньшими длинами волн. На данный момент наиболее перспективной представляется спектральная область вблизи края поглощения бора ( $\lambda \approx 6,7$  нм), для которого возможен синтез зеркальной оптики на основе лантан-борсодержащих материалов с теоретическим значением коэффициента отражения при нормальном падении до 85 %.

Целью предлагаемой работы является создание и всестороннее теоретико-экспериментальное исследование лантан-борсодержащих многослойных зеркал. Особое внимание будет уделено влиянию на их отражательные характеристики границ раздела материалов. В частности, для уменьшения длины переходных границ предлагается осаждение антидиффузионных слоёв, что должно привести к увеличению градиента диэлектрической проницаемости и к росту коэффициента отражения зеркал.

Настоящее патентное исследование направлено на определение технического уровня и патентной ситуации относительно объекта, исследуемого в рамках выполнения данного Госконтракта.

## **Результаты анализа поиска патентной информации по теме “лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$ нм)”**

Патентный поиск проводился по ключевым словам и рубрикам МПК по странам: США, Россия, Япония, Китай, странам Европейского Сообщества, в частности Германии.

При проведении патентного поиска использовались Web-сайты патентных ведомств стран поиска, а также патентный фонд Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ.

Просмотрено всего более 100 патентных документов, детально проанализировано 4 патентных документа.

В результате проведенного исследования патентной ситуации по тематике “лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$  нм)” установлено:

1. Основное число заявок по многослойной рентгеновской оптике относится к диапазону жесткого рентгеновского излучения, либо окрестности 13,5 нм. Первые патенты описывающие области применения многослойной рентгеновской оптики начали появляться в начале 1990-х. Однако резкий рост числа работ, наблюдающийся в последнее время, связан с интересом к проекционной ЭУФ-литографии на длине волны 13,5 нм.

2. Лидирующее положение по числу патентов по данной тематике занимают США. Однако в настоящее время все более активную роль начинают играть страны Западной Европы (особенно Германия) и Япония. Россия значительно отстает и в отличие от мировых тенденций наблюдается сокращение патентуемых работ в области многослойной рентгеновской оптики.

3. Научные исследования, проводимые в рамках данного Госконтракта, направлены на изучение отражательных характеристик, внутреннего строения и процессов роста многослойных структур на основе пары материалов La и  $V_4C_5$ , оптимизированных на длину волны 6,7 нм (область аномальной дисперсии бора), возможности повышения пикового коэффициента отражения за счет применения антидиффузионных (буферных слоев) с целью применения данной структуры для нанолитографии следующего поколения.

Проведенный патентный поиск показывает, что только четыре группы в мире рассматривают данную пару материалов как перспективную, причём в США и Японии ее рассматривают как анализатор для рентгеновской спектроскопии в окрестности излучения

K $\alpha$  линии бора. Работы, представленные немецким научным центром GKSS и голландской фирмой ASML, рассматривают данную пару в качестве основы зеркал для проекционной ЭУФ-литографии и микроскопии высокого разрешения в окрестности длины волны 7 нм.

Большое количество работ, посвященных данной паре материалов, опубликованных в ведущих научных журналах, таких, как, например, “Microelectronic Engineering”, “Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A”, “ SPIE Conference Proceedings”, “X-Ray-Spectrometry” и др., свидетельствует как о понимании важности указанных проблем мировым сообществом, так и о чрезвычайной актуальности работ, выполняемых по данному Госконтракту.

Совершенно неохваченным в литературе остается вопрос о внутреннем строении многослойных структур на основе пары материалов La/B<sub>4</sub>C. На наш взгляд понимание физики роста, в частности, влияния антидиффузионных слоев на взаимное проникновение материалов может побудить к развитию такие направления как литография на длине волны 6,7 нм, рентгеновская микроскопия и спектроскопия.

## **Заключение**

На первом этапе патентных исследований проведен поиск патентных документов с целью определения технического уровня и патентной ситуации относительно результатов, полученных в ходе выполнения Госконтракта по теме “лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора (  $\approx 6,7$  нм)”. Для последующего анализа отобрано и проанализировано четыре патентных документа. Определены наиболее близкие аналоги к тематике данного Госконтракта. Проведенный на данном этапе поиск позволит на следующем этапе патентных исследований определить патентоспособность и патентную чистоту объектов, разрабатываемых в рамках выполняемого нами Госконтракта и всех последующих научно-исследовательских работ в данном направлении.

## Приложение А1

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института физики  
микроструктур РАН, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_/З.Ф. Красильник/

"30" апреля 2010 г.

### ЗАДАНИЕ

на проведение патентных исследований

**Наименование НИР «Лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$  нм)»**

**Гос. контракт № 02.740.11.0540**

**Этап работы: 1**

**Сроки выполнения: 22.03 – 15.05.2010**

**Задачи патентных исследований:** Патентный поиск с целью исследования технического уровня и патентоспособности разработанных в ходе выполнения вышеуказанной НИР лантан-борсодержащих многослойных зеркал для спектральной области аномальной дисперсии бора.

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. (начало, окончание).	Отчетные документы
1	2	3	3	4
Поиск и анализ патентной информации	Отдел № 130	Заведующий лаб. №132, Н.И. Чхало  н.с. отд.130 А.Е. Пестов	<b>22.03.2010 – 30.04.2010</b>	Отчет о патентных исследованиях

Зав. лабораторией 132, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Н.И. Чхало

Н.с. отд. 130, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

А.Е. Пестов

## Приложение А2

### РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА

**Наименование работы (темы):** «Лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$  нм)»

**Государственный контракт № 02.740.11.0540**

**Дата утверждения задания:** 22 марта 2010 г.

**Цель поиска информации:** исследование технического уровня и патентоспособности разработанных в ходе выполнения вышеуказанной НИР лантан-борсодержащих многослойных зеркал для спектральной области аномальной дисперсии бора.

**Обоснование регламента поиска:** Патентный поиск проводится с использованием патентно-информационных баз данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС) и патентно-информационных баз данных United States Patent and Trademark Office (USPTO) и Европейских патентов (*esp@cenet*® database ) по классам международной патентной классификации изобретений (МПК), а также с использованием источников информации, указанных в таблице.

**Начало поиска** 22.03.2010 г.,

**окончание поиска** 26.04.2010г.

Предмет поиска (объект исследования, его составные части).	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск		Ретроспек-тивность	Наименование информа-ционной базы (фонда)
		Патентные	НТИ		

		Наименование	Классификационные рубрики: МПК (МКИ), МКПО, НКИ и др.	Наименование	Рубрики УДК и другие		
1	2	3	4	5	6	7	8
Лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$ нм).	Россия, США, Страны Европейского Сообщества, Япония, Канада, Китай.	WEB-сайты Патентных Ведомств стран поиска  Официальные бюллетени Патентных Ведомств стран поиска. Бюл. "Изобретения стран мира" Кассеты ВПТБ	<b>МПК 7 и 8 редакции:</b> B82B 1/00 B82B 3/00 G21K 1/06 G02B 5/08 G02B 5/28  <b>НКИ США:</b> 359/359, 359/839, 378/84, 977/890	Российские журналы: «ЖЭТФ», «ЖТФ», «Письма в ЖТФ», «Письма в ЖЭТФ»; международные: «Physical Review», «Physical Review Letters», «Journal of Applied Physics», «Applied Physics Letters»,	<b>535.1-15</b> <b>535.012</b> <b>535.012</b>	20 лет	<b>Патентный фонд ФИПС,</b> <b>Реферативная БД: RUABRU.</b> <b>Полнотекстовые БД: USPTO;</b> <b>ESP@CENET.</b> <b>Патентный фонд Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ВПТБ).</b> Поисковые системы общего назначения (google, yandex) и специализированные (www.patentstorm.us)

Заведующий лаб. №132

Н.И. Чхало

Н.с. отд. 130

А.Е. Пестов



## Приложение А3

### ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

6. Поиск проведен в соответствии с Заданием, утвержденным директором Института физики микроструктур РАН, д.ф.-м.н. З.Ф. Красильником от 22.03.2010 и Регламентом поиска от 22.03.2010 г.
7. Этапы работы - 1
8. Начало поиска 22.03.2010 г. Окончание поиска 26.04.2010 г.
9. Сведения о выполнении регламента поиска: поиск проведен в полном соответствии с Регламентом.
10. Для последующего анализа отобрано 4 патентных документа. Всего в ходе поиска проанализировано более 100 патентных документов.

Таблица 1. Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения (полезной модели)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования
1	2	3	4	5
Лантан-борсодержащие многослойные зеркала для спектральной области аномальной дисперсии бора ( $\lambda \approx 6,7$ нм)	Патент US 6763086 НК США 378/84; 378/49 МПК G01N23/223; G21K1/06; G01N23/22; G21K1/00 Публ. 13.07.2004	Изобретатель: Platonov Yuriy (Тroy, MI) Заявитель: Osmic, Inc. (Auburn Hills, MI) Заявка: US 10/235355, 05.09.2002	Method and apparatus for detecting boron in x-ray fluorescence spectroscopy	
	Патент US 6920199 НК США 378/84; 378/34 МПК G02B5/08; G21K1/06; G21K1/00 Публ. 19.07.2005	Изобретатель: Michaelsen, Carsten (Geesthacht, DE) Заявитель: GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH (Geesthacht, DE) Заявка: US 10/117069,01.04.2002	Mirror element for the reflection of x-rays	

	<p>Патент US 6836533          НК США 378/84, 378/44,          378/42          МПК G01N23/223;          G21K1/06; G01N23/22;          G21K1/00          Публ. 28.12.2004</p>	<p>Изобретатель: Shimizu, Kazuaki          (Takatsuki, JP)          Заявитель: Rigaku Industrial          Corporation (Osaka, JP)          Заявка: US 10/258845,29.10.2002</p>	<p>Multi-layer film spectroscopic          element for boron fluorescene X-          ray analysis</p>	
	<p>Патент 20080266654          НК США 359/368          МПК AG02B2100FI</p>	<p>Изобретатель: F.J.P. Schuurmans          A.J. Bleeker, M. Marinus, J.W.          Van Herpen, V.Ye. Banine, V.V.          Ivanov, K.N. Koshelev, V.M.          Krivtsun          Заявитель: ASML          NETHERLANDS B.V.</p>	<p>Extreme ultraviolet microscope</p>	

