

Российская академия наук

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РАН

УДК 537.9
№ госрегистрации 01201170369
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН,
профессор

 З.Ф. Красильник

«16» 09 2011 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по Государственному контракту №16.552.11.7007 от "29" апреля 2011 г.

Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн»

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

(промежуточный, этап №1)

Научный руководитель,
доктор физ.-мат. наук

 16.09.11

В. И. Шашкин

подпись, дата

Нижний Новгород 2011

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
зав. отд., д.ф.-м.н.

 16.09.11

подпись и дата

В. И. Шашкин (введение,
разделы 1,2, 3 заключение)

Исполнители темы

Ответственный
исполнитель,
в.н.с., д.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

Ю. Н. Дроздов (раздел 4)

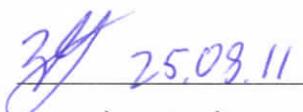
Зав. лаб., д.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

Н.И. Чхало (раздел 5)

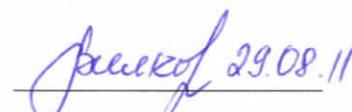
ведущий электроник,
к.ф.-м.н.

 25.09.11

подпись и дата

В.Р. Закамов (раздел 3)

Нач. отдела закупок ИФМ
РАН

 29.08.11

подпись и дата

О.В. Вилкова (пункт 4.4)

н.с., к.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

П.В. Волков (раздел 3)

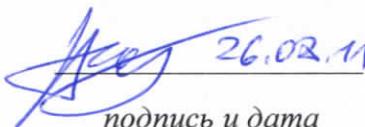
с.н.с., к.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

М.Н. Дроздов (раздел 4)

Ученый секретарь ИФМ,
к.х.н.

 26.08.11

подпись и дата

Г.Л. Пахомов (раздел 4)

с.н.с., к.ф.-м.н.

 29.08.11

подпись и дата

А.Ю. Аладышкин (раздел 4)

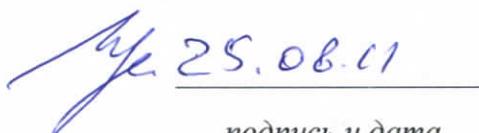
с.н.с., к.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

С.Н. Вдовичев (раздел 4)

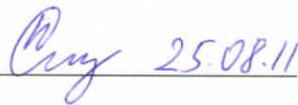
с.н.с., к.ф.-м.н.

 25.08.11

подпись и дата

С.А. Гусев (раздел 4)

н.с., к.ф.-м.н.


_____ 25.08.11
подпись и дата

К.Е. Спирин (раздел 4)

м.н.с.


_____ 28.08.11
подпись и дата

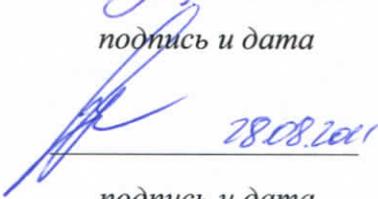
В.В. Травкин (раздел 4)

технолог


_____ 28.08.11
подпись и дата

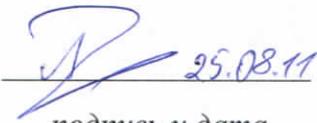
А.Н. Тропанова (раздел 4)

аспирант


_____ 28.08.2011
подпись и дата

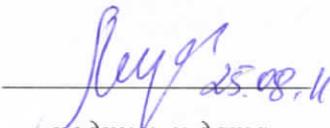
Д.В. Юрасов (раздел 4)

Инженер- исследователь


_____ 25.08.11
подпись и дата

П.А. Юнин (раздел 4)

Нормоконтролер


_____ 25.08.11
подпись и дата

А.В. Мурель

РЕФЕРАТ

Отчет 93 с., 4 табл., 25 рис., 93 источника.

НИЗКОБАРЬЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, ПРИБОРЫ ВИДЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН, ДИОД МОТТА, ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Выполнены научные исследования и работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» (ЦКП ИФМ РАН). По литературным источникам и патентам изучено современное состояние исследований в области получения изображений объектов в миллиметровом диапазоне длин волн на основе матриц высокочувствительных планарных детекторов, созданных методами нанотехнологий. Сделан вывод о перспективности выбранного направления исследований.

В результате теоретических исследований по низкобарьерным полупроводниковым диодам методами численного моделирования изучены процессы электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта. Исследованы эффекты, связанные с квазибаллистическим движением электронов. Получены вольт-амперные характеристики диода. Проведен сопоставительный анализ результатов моделирования, выполненного с использованием различных подходов (в локально-полевой модели, методом Монте-Карло). Проведено сравнение расчетных вольт-амперных характеристик с экспериментальными зависимостями. Определены границы применимости использованных подходов. Предложена методика выращивания структур для низкобарьерных диодов на основе GaAs в едином процессе газофазной эпитаксии.

В направлении развития ЦКП ИФМ РАН проведены маркетинговые исследования, проведены тендеры и заключены контракты на закупку: рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discovery, лазерного литографа μ PG101, источника бесперебойного питания Smart-UPS к электронному микроскопу и высоковакуумной установки исследования многослойных наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности СММ-2000. Выполнены разработки по совершенствованию методик исследований. Изучена чувствительность масс-спектрометра TOF.SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов и отработан количественный безэталонный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на приборе TOF.SIMS-5.

Применительно к изучению супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм проанализированы

возможности стандартных методов исследования шероховатых поверхностей. Показано, что наибольшей адекватностью обладает метод зеркального отражения. Экспериментально опробованы процедуры аттестации формы поверхности зеркал и aberrаций проекционного объектива для стенда нанолитографа с субнанометровой точностью.

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	8
ВВЕДЕНИЕ	9
1 Аналитический обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы	11
2 Проведение патентных исследований	17
2.1 Введение	17
2.2 Обзор патентной документации	18
2.3 Заключение	21
3 Проведение теоретических исследований и выращивание серии тестовых структур	22
3.1 Моделирование электронного транспорта в диоде Мота методом Монте-Карло	22
3.1.1 Введение	22
3.1.2 Математическая модель	24
3.1.3 Обсуждение результатов	25
3.1.4 Выводы	30
3.2 Методика изготовления планарно-ориентированных низкобарьерных диодов Мотта миллиметрового диапазона длин волн	31
4 Проведение маркетинговых исследований по приобретаемому оборудованию. Объявление тендеров на закупку оборудования. Заключение договора (контракта) с поставщиком на закупку оборудования. Проведение авансовых платежей	33
4.1 Маркетинговые исследования покупаемому спецоборудованию	33
4.1.1 Рентгеновский дифрактометр	33
4.1.2 Установка лазерной литографии	35
4.1.3 Источник бесперебойного питания	36
4.1.4 Высоковакуумная установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности	37
4.1.5 Система напыления и быстрого термического отжига контактов	40
4.1.6 Станция ожижения гелия с системой сбора и наполнительной рампой	41

4.1.7 Сверхпроводящая магнитная система замкнутого цикла на базе криогенного рефрижератора	42
4.1.8 Атомно-силовой микроскоп для изучения шероховатости криволинейных оптических поверхностей в средне- и высокочастотных диапазонах с субангстремной чувствительностью	43
4.1.9 Генератор сигналов серии 50 ГГц	45
4.2 Формирование заявок по закупаемому спецоборудованию, объявление тендеров и заключение контрактов на поставку	45
5 Проведение исследований в интересах сторонних организаций	47
5.1 Общие подходы к проведению исследований в интересах сторонних организаций в ЦКП ИФМ РАН	47
5.2 Описание исследований в интересах сторонних организаций, выполненных в ЦКП ИФМ РАН в 2011 году	48
5.3 Развитие системы услуг и работы по метрологическому обеспечению ЦКП ИФМ РАН	50
5.4 Развитие измерительных методик в ЦКП ИФМ РАН	53
5.4.1 Анализ чувствительности масс-спектрометра TOF.SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов	54
5.4.2 Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5	62
6 Экспериментальные исследования улучшения пространственного разрешения в схемах литографии за счет перехода в область экстремального ультрафиолета	67
6.1 Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии	68
6.1.1 Требования к качеству подложек для многослойной рентгеновской оптики	68
6.1.2 Методика эксперимента	69
6.1.3 Экспериментальная часть	73
6.1.4 Обсуждение результатов	77
6.2 Двухзеркальный проекционный объектив нанолитографа на $\lambda=13,5$ нм	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	87

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие обозначения и сокращения:

- МЛЭ - молекулярно-лучевая эпитаксия;
- МОГФЭ – металлоорганическая газофазная эпитаксия;
- АСМ – атомно-силовая микроскопия;
- ПЭМ - просвечивающая электронная микроскопия;
- ВИМС – вторично ионная масс-спектрометрия;
- РД - рентгеновская дифрактометрия
- ФЛ - фотолюминесценция;
- КТ – квантовая точка;
- КЯ – квантовая яма;
- ТМГ – триметилгаллий;
- ТЭБ – триэтилбор;
- ТМИ – триметилиндий;
- МС – монослой, слой монокристалла, по толщине совпадающий с периодом повторения кристалла в направлении нормали к поверхности;
- МП – металл-полупроводник;
- ВАХ – вольт-амперные характеристики;

ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР является государственный контракт № 16.552.11.7007 от "29" апреля 2011г. по теме "Развитие центров коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов нанoeлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн", выполняемый в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» научно-исследовательские работы по лоту шифр «2011-5.2-552-001» «Развитие центрами коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в рамках основных направлений реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы».

В области научных исследований проект направлен на решение проблемы получения изображений объектов в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени на основе матриц высокочувствительных планарных детекторов, созданных методами нанотехнологий. В ходе проекта должна быть доказана возможность создания компактного матричного детекторного приёмника миллиметрового диапазона длин волн.

Основной объем финансирования по проекту направлен на развитие Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур», ЦКП ИФМ РАН, закупку спецоборудования и развитие методик исследований.

В Техническом задании на этапе 1 «Разработка теории и методологии исследования» было предусмотрено выполнение следующих работ:

- Проведение патентных исследований.
- Аналитический обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы.
- Проведение теоретических исследований и выращивание серии тестовых структур.
- Проведение маркетинговых исследований по приобретаемому оборудованию.
- Объявление тендеров на закупку оборудования.
- Заключение договора (контракта) с поставщиком на закупку оборудования.
- Проведение авансовых платежей.
- Проведение исследований в интересах сторонних организаций.

- Экспериментальные исследования улучшения пространственного разрешения в схемах литографии за счет перехода в область экстремального ультрафиолета (внебюджетное финансирование).

В настоящем отчете приведены результаты выполненных работ. В разделе 1 приведен аналитический обзор, отражающий современное состояние исследований в области получения изображений объектов в миллиметровом диапазоне длин волн. В разделе 2 проанализированы патенты в этой области. На основании изучения литературы и патентов сделан вывод о перспективности выбранного направления исследований. Выполненные теоретические исследования описаны в разделе 3. Работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» описаны в разделе 4. В частности, включены:

- маркетинговые исследования по закупаемому оборудованию (подраздел 4.1);
- формирование технических условий, объявление тендеров на закупку по позициям первого года и контракты на закупку (подраздел 4.2);

Выполнение исследований в интересах сторонних организаций и разработки по совершенствованию методик исследований на оборудовании ЦКП обсуждены в разделе 5.

В разделе 6 приведены результаты экспериментальных исследований по литографии экстремального ультрафиолета. Проанализированы возможности стандартных методов исследования шероховатости поверхностей подложек, описаны методы аттестации формы поверхности зеркал и aberrаций объектива для стенда нанолитографа с субнанометровой точностью.

Запланированные в ТЗ и КП на этапе 1 НИР значения индикаторов и показателей Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» были достигнуты. Плановые значения на 2011 год успешно выполняются и будут достигнуты по итогам этапов 1 и 2.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ, НОРМАТИВНОЙ, МЕТОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время в ведущих мировых лабораториях проводятся масштабные исследования, направленные на создание устройств для приема и генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области частот (0,1÷10 ТГц) [1]. Такая активность диктуется широкими перспективами применения технических средств этого диапазона в астрофизике, спектроскопии и экологии для контроля окружающей среды, начиная от мониторинга локальных производственных процессов и заканчивая глобальными процессами в атмосфере [2,3]. Традиционная область гражданского применения за последнее время существенно расширилась за счет того, что развились новые технологии (например, фемтосекундная оптоэлектроника), появились приоритетные прикладные задачи (например, противодействие терроризму, диагностика в медицине). Отдельным и важным направлением является разработка систем связи, обнаружения и видения. Для этих задач актуальным является субтерагерцовый диапазон частот (0,1÷1 ТГц), в котором сохраняется относительно малое поглощение в воздухе при достаточном пространственном разрешении и широких полосах частотных каналов [4-7]. Очевидны перспективы применения этих систем в антитеррористических мероприятиях и для решения военных задач поиска и обнаружения целей. Поэтому большие усилия предпринимаются по созданию твердотельных систем генерации, приёма и преобразования излучения этого частотного диапазона [8-10].

Большинство из задач гражданского применения требуют устройств, которые могут регистрировать сигнал на расстоянии единиц-десятков метров от источника излучения. Для таких систем могут применяться детекторные приёмники на диодах с барьером Шоттки. Они являются наиболее распространенными нелинейными, чувствительными элементами. Диоды с барьером Шоттки широко используются в смесителях и умножителях частоты суб- и терагерцового диапазонов частот. Существенно реже диоды с барьером Шоттки применяют на этих частотах в малосигнальном режиме, как квадратичные и видео- детекторы. Вместе с тем, интерес к этим применениям вызван необходимостью построения систем радиовидения и приёма широкополосных терагерцовых сигналов [11]. Решение задачи предполагает построение многоэлементных матричных приёмников, расположенных в фокальной плоскости антенной системы.

Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании нужно уменьшать эффективную высоту барьера Шоттки и не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию детектора и приводит к снижению уровня шумов ($1/f$ – типа и

других) из-за отсутствия постоянного тока смещения. Для детектирования без постоянного смещения в миллиметровом диапазоне длин волн используются низкобарьерные диоды с сильным легированием приповерхностной области полупроводника [12], диоды с объёмным барьером [13,14] и туннельные диоды [15,16]. Недавно были предложены для этой цели гетероструктуры полуметалл-полупроводник ErAs/GaAs [17].

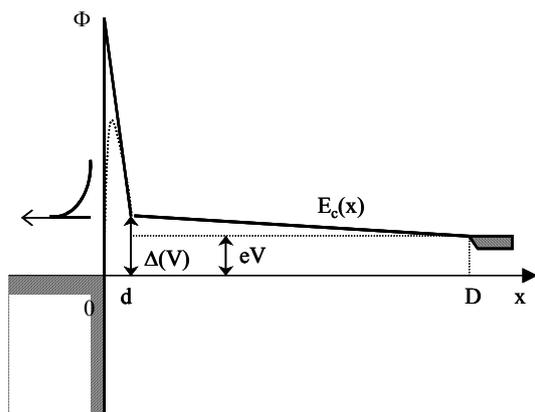
В большей части, исследования чувствительности низкобарьерных диодов проводились в зауженных волноводах или в копланарных линиях. Известно сравнительно мало исследований чувствительности детекторов на основе антенн с непосредственным включением диодов [2,16]. При монтаже в антенны трудно судить о полной компенсации реактивной составляющей импеданса диода, поскольку полное описание антенн и приемных трактов отсутствует. В последнее время появились работы, в которых согласующие элементы в микрополосковом исполнении и детекторные диоды выполнены на единой подложке GaAs [18-20]. Существующая теория антенн на толстых диэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью указывает, что эффективность известных простых антенн на GaAs должна быть низкой. Для увеличения эффективности детекторов над подложкой GaAs с антенной встраивают дополнительные линзы [18,19]. Иногда подложку GaAs помещают в волновод и применяют дополнительную рупорную антенну, добиваясь в результате высоких значений чувствительности в трёхмиллиметровом диапазоне длин волн [20]. Следует признать, что все перечисленные конструкции являются многокомпонентными и достаточно сложными. В матричном исполнении 2×2 , при плотной компоновке была опробована только конструкция с рупорами [20].

Около 10 лет назад за рубежом начались активные исследования по получению изображений в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени (более 10 кадров в секунду). Если в поисковой системе интернета набрать “millimeter-wave imaging”, то будет обнаружено более 50000 документов. Из них следует, что исследования по миллиметровому видению с использованием матричных приёмников в фокальной плоскости (как в цифровой видеокамере) проводятся в основном в США и Великобритании. Таким образом, за рубежом более 10 лет ведутся работы по миллиметровому видению для военных и гражданских применений [6,21]. Исследования по системам видения миллиметрового диапазона проводят государственные и частные лаборатории США - Air Force Research Laboratory, Lockheed Martin Aeronautics Company, Northrop Grumman Space Technology, фирмы HRL Laboratories (принадлежит Boeing, General Motors, Raytheon), Trex Enterprises, Millivision и др. В Великобритании – Farran Technologies (принадлежит Smiths Group), QunetiQ, ThruVision (дочерняя компания

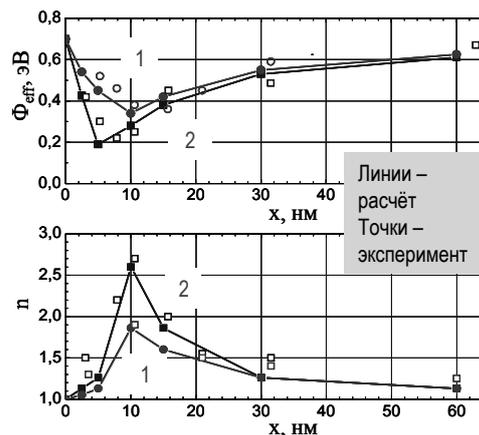
Rutherford Appleton Laboratory), TeraView (дочерняя компания Toshiba Research Europe's Laboratories) и др. Примером наиболее успешной разработки являются камеры миллиметрового видения, построенные HRL совместно с Ttech. Основа камеры – многоэлементная решетка фокальной плоскости. Рабочая частота – 94 ГГц, поле зрения – $20^\circ \times 30^\circ$, размерность 192×128 элементов (более 25000 детекторов), частота кадров до 30 в секунду. Каждый детектор представляет собой туннельный диод, в котором обеспечивается чувствительное детектирование сигналов без постоянного смещения. Есть несколько разновидностей камеры (для вертолёта, для контроля оружия под одеждой и др.). Стоимость изготовленных камер составляет около 1 000 000 \$, разработчики надеются снизить цену до 200 000 \$. В камере используются последние достижения нанотехнологии (гетероструктура детекторного диода), миллиметровой микроэлектроники (антенная решётка) и компьютерной обработки сигналов (получение сверхразрешения).

В ИФМ РАН в коллективе исполнителей настоящего контракта ранее были выполнены обширные исследования чувствительных детекторов нового поколения для миллиметрового диапазона. Были разработаны диоды с пониженной высотой барьера на основе наноструктур Al/GaAs с приповерхностным дельта-легированием. Уменьшение эффективной высоты барьера Шоттки позволяет получить детектор сигналов, работающий без постоянного смещения [2,22]. Достигнутая пороговая чувствительность разработанных волноводных детекторов в трехмиллиметровом диапазоне составила около 10^{-12} Вт·Гц^{-1/2}. Очевидно также, что отсутствие цепей смещения и малый собственный шум детекторов приобретают принципиальное значение при создании многоэлементных матричных приёмных систем [9].

Были проведены экспериментальные и теоретические исследования транспортных процессов в туннельных контактах МП с приповерхностным δ -легированием [26-33]. Развита технология изготовления структур. Проанализированы экспериментальные ВАХ структур с модифицированными контактами Мотта. Разработана теоретическая модель, описывающая токоперенос с помощью решения аналитических уравнений. Была показана возможность управления путём δ -легирования вблизи границы МП эффективной высотой барьера Φ_{eff} к n-GaAs(100) при сохранении небольших значений фактора идеальности n . На рис. 1.1 схематически показан ход потенциала в контакте Мотта с δ -легированием и приведены данные экспериментов и расчётов для величин Φ_{eff} и n в контактах на основе Al/ δ (Si)-GaAs.



а



б

Рисунок 1.1 Профиль потенциала в контакте Мотта – (а); эффективная высота барьера Φ_{eff} и фактор идеальности n в зависимости от глубины залегания δ -слоя с концентрацией N_s , 10^{12} см^{-2} : 1 - 4, 2 - 8.

На основе подхода Мерфи и Гуда [23] была решена задача о туннелировании в контактах МП с изотипным δ -легированием. При полном обеднении δ -слоя, как показано на рис. 1.1а, получено аналитическое выражения для плотности тока

$$j(V) = A^* T^2 \cdot \frac{\exp(-b)}{1 - kT \cdot c} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta(V)}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right],$$

справедливое при высокой туннельной прозрачности барьера [29]. Коэффициенты b и c , слабо зависящие от напряжения, определяют уменьшение постоянной Ричардсона A^* . Сравнение с экспериментом показывает, что теория даёт лишь качественное описание ВАХ.

Для выяснения причин расхождения теории и эксперимента был развит феноменологический подход к диагностике параметров низкобарьерных диодов, основанный на анализе зависимости дифференциального сопротивления диода от напряжения $R_d(V)$. Проведённое исследование показало, что для точного и полного описания ВАХ диода нужно учитывать последовательно включенный n - n^+ -переход и пространственный заряд инжектированных электронов.

Была решена задача о токопереносе в контактах Мотта при учёте пространственного заряда в i -слое. Получены аналитические выражения для потенциала, ёмкости и тока. Основным допущением было пренебрежение током инжекции и объёмным легированием i -слоя. В сравнении с классическим результатом Мотта [24], учёт пространственного

заряда замедляет рост тока при прямом смещении и уменьшает нелинейность ВАХ. Инжекция носителей тока в *i*-слой приводит к резкому возрастанию ёмкости контакта.

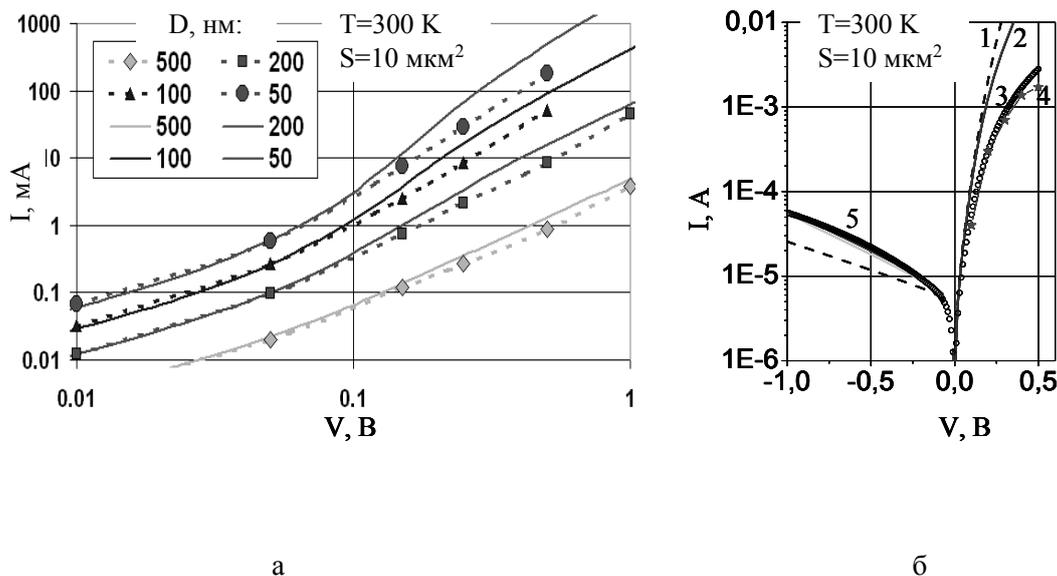


Рис. 1.2 ВАХ: (а) - диодов Мотта с барьером $\Delta=0,23$ эВ и толщиной *i*-слоя $D = 50, 100, 200, 500$ нм (линии – решение, пунктир - численный расчёт); (б) - низкобарьерных диодов при $\Phi=0,7$ эВ, $d=4,7$ нм, $N_s=8,8 \cdot 10^{12}$ см⁻², $D=100$ нм, (1, 2, 4, 5 – расчёты, 3 – эксперимент).

В дрейфово-диффузионном приближении было получено аналитическое решение задачи об инжекции носителей тока в *i*-слой при самосогласованных граничных условиях на контактах и при учёте самого тока инжекции. Такое решение описывает одновременно контактные и объёмные инжекционные эффекты и позволяет рассчитать потенциал, электрическое поле и ВАХ во всём диапазоне напряжений для целого ряда структур с любой комбинацией металлических и полупроводниковых контактов, в том числе имеющих гетеробарьеры, препятствующие инжекции электронов. Ранее для этого использовались различные приближения [25]. В частности, при больших токах из решения следует закон Мотта-Герни [25]. Пример расчёта прямых ветвей ВАХ контактов Мотта показан на рис. 1.2а.

Полученные решения позволили сформулировать обобщённый эмиссионно-диффузионный подход к вычислению тока в низкобарьерных контактах Мотта. Учитываются туннельные процессы на границе МП и эффекты пространственного заряда в базовом *i*-слое. На рис. 1.2 б приведены ВАХ: кривая 1 – расчёт на основе (1) с учетом пространственного заряда, 2 – дополнительно учитывается вырождение электронов в контактах, 3 – эксперимент, 4 – при использовании статистики Ферми в контактах и в *i*-слое. Для обратной ветви ВАХ все способы вычисления тока дают результат (5), близкий

к данным эксперимента, если учесть туннельный ток через основание туннельного барьера при энергиях $E < \Delta$ (рис. 1.1 а).

Вместе с тем, использованный аналитический локально-полевой подход имеет существенные ограничения из-за трудностей с учетом граничных условий. Необходимо определить область применимости предложенных моделей, сопоставляя аналитический анализ с результатами численного моделирования токопереноса методом Монте-Карло и с экспериментальными данными.

Таким образом, обзор современного состояния исследований показывает актуальность тематики, направленной на создание устройств для приема и генерации электромагнитного излучения в терагерцовой области частот. Имеющийся в группе исполнителей настоящего контракта научный задел оправдывает выбор направления исследований и позволяет выполнять работы, конкурентно способные на мировом уровне.

2 ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Общие данные об объекте исследования

Объектом исследования является разрабатываемый в рамках НИР новый способ регистрации электромагнитного излучения основанный на использовании многослойных наноструктур металл-полупроводник. Этот способ может быть использован для создания приемных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, пригодных для решения многих задач (противодействие терроризму, навигация в сложных погодных условиях, контроль потоков транспорта, телекоммуникация, контроль состояния атмосферы и др.).

В основе предлагаемого технического решения лежит использование в качестве чувствительного элемента приемника электромагнитного излучения структуры, состоящей из последовательно включенных переходов металл-полупроводник-металл с барьерами Шоттки (Мотта). Такая структура обладает симметричной вольтамперной характеристикой, и при подаче на нее сверхвысокочастотного сигнала, постоянная составляющая напряжения на выводах структуры не появляется. Однако на каждом из переходов металл-полупроводник постоянное обратное напряжение возникает. Принцип действия предлагаемого чувствительного элемента состоит в регистрации этого напряжения. Предлагаемое устройство может быть реализовано в двух вариантах, отличающихся по способу регистрации обратного напряжения на переходах металл-полупроводник. В первом варианте (вариант двухполюсника) обратные напряжения, возникающие на переходах, изменяют дифференциальное сопротивление и дифференциальную емкость каждого из них. В результате меняется суммарный импеданс чувствительного элемента. Это изменение можно зарегистрировать с помощью измерительной низкочастотной цепи или на постоянном токе. Во втором варианте (вариант четырехполюсника) в качестве чувствительного элемента используется структура, содержащая под переходами металл-полупроводник проводящий канал, к которому сформированы два дополнительных контакта для подключения низкочастотной цепи. Обратные напряжения, возникающие на переходах, изменяют концентрацию носителей в канале за счет эффекта поля. В результате изменяется импеданс канала. Это изменение можно зарегистрировать с помощью измерительной низкочастотной цепи или на постоянном токе.

2.2 Обзор патентной документации

Патентный поиск проводился по ключевым словам и рубрикам МПК по патентной документации следующих стран:

- РФ с 1992 по н.в. (RU);
- США с 1980 по н.в. (US);
- Япония с 1980 по н.в. (JP),

а также международных заявок на изобретение PCT с 1978 по н.в. (WO).

Просмотрено более 200 патентных документов, отобрано для анализа 11 патентных документов.

В ходе поиска не выявлено патентных документов, содержащих информацию об использовании в качестве чувствительного элемента приемника электромагнитного излучения структуры, состоящей из последовательно включенных переходов металл-полупроводник-металл с барьерами Шоттки (Мотта), обладающей симметричной вольтамперной характеристикой, и подключенной в варианте двухполюсника. Не выявлено также технических решений, в которых подобный чувствительный элемент был бы реализован путем встречного последовательного включения двух диодов Шоттки со сформированными омическими контактами к полупроводниковым слоям.

Полупроводниковые структуры с симметричными вольтамперными характеристиками не могут использоваться для квадратичного детектирования, но часто используются для реализации фотоприемных устройств. В качестве примера можно привести патент RU2022412. Данное изобретение относится к оптоэлектронике и, в частности, к полупроводниковым фотоприемникам с отрицательным дифференциальным сопротивлением и симметричной относительно начала координат вольтамперной характеристикой и, может быть использовано в качестве фотодатчика переменного тока, или фотоприемного элемента оптопары в системах автоматики, переключающей и преобразовательной техники для бесконтактной коммутации и управления в цепях переменного тока. Сущность изобретения состоит в фотосимисторе на основе полупроводниковой структуры, содержащем выполненные в слое исходного материала базовые области с размещенными в них внешними эмиттерными областями, снабженными металлическими контактами и, по крайней мере, один свободный для доступа светового потока участок, расположенный симметрично относительно оси или плоскости симметрии структуры, базовые области расположены с одной стороны структуры симметрично относительно оси или плоскости ее симметрии.

Встречное последовательное включение диодов Шоттки используется в различных схемах в качестве ограничителей тока. Например, в патенте RU2081509 представлено

уменьшить суммарную емкостную нагрузку для предыдущего логического элемента и ограничить амплитуду управляющего включающего тока.

Хорошо известно встречное параллельное включение диодов, также являющееся примером элемента цепи, обладающим симметричной вольтамперной характеристикой. Такое включение диодов используется для построения фазовых детекторов, применяемых в различных сверхвысокочастотных устройствах (Stephen A. Maas “Nonlinear Microwave and RF Circuits”). Принцип действия фазового детектора основан на том, что диоды играют роль электронных ключей, которые открываются под действием сильного сигнала опорной частоты и в эти моменты через диоды проходят импульсы тока частоты сигнала. Длительность импульсов этого тока определяется углом отсечки опорного напряжения.

Существуют различные мостовые способы включения диодов в схемы и линии передач, используемые в выпрямителях, смесителях, детекторных секциях и т.д. (Stephen A. Maas “Nonlinear Microwave and RF Circuits”, “The RF and Microwave Circuit Design Cookbook”), при которых между диодами есть общая точка, к которой можно подключиться. Например в патенте RU2350973 описывается детектор сверхвысокочастотных сигналов, который также может быть использован в качестве смесителя. В конструкции детектора используется встречное включение диодов, общая точка которых подключена к линии передачи. При втором варианте предлагаемого в НИР технического решения (вариант четырехполосника), такой общей точкой является проводящий канал чувствительного элемента. Наиболее близким аналогом предлагаемого чувствительного элемента является хорошо известный двухзатворный полевой транзистор. Двухзатворный транзистор используется в преобразователях частоты в режиме смещения (Stephen A. Maas “Nonlinear Microwave and RF Circuits”). При этом в канале транзистора между затвором и истоком (стоком) течет высокочастотный ток. Это накладывает жесткие требования к быстродействию канала. Отличие предлагаемого технического решения состоит в том, что измерительная цепь (содержащая канал) является низкочастотной, в ней не течет высокочастотный ток. Кроме того, высокочастотное поле сосредоточено в области под затворами, удалено от металлических элементов низкочастотной цепи и не взаимодействует с ними. В случае использования барьерных контактов к каналу, предлагаемый чувствительный элемент может быть вовсе избавлен от омических контактов между металлом и полупроводником, и имеет только

контакты с барьером Шоттки (Мотта) – в этом состоит второе отличие от двухзатворного полевого транзистора.

Важной частью предлагаемого нового способа регистрации электромагнитного излучения является точное измерение изменения импеданса полупроводниковой структуры в удобном диапазоне частот. В выявленных патентных документах широко представлены различные способы и устройства для измерения импеданса. Патент RU2301425 относится к измерительной технике, а именно к способам измерения полных входных сопротивлений низкочастотных и высокочастотных электрических цепей и к устройствам для их осуществления. Задачами, на достижение которых направлено предлагаемое техническое решение, являются расширение диапазона рабочих частот, в котором производится измерение полных входных сопротивлений электрических цепей, и повышение точности измерения полных входных сопротивлений электрических цепей. Предложенное устройство содержит генератор синусоидальных напряжений, который выполнен в виде каскадно-соединенных микроконтроллера, частото задающего элемента, синтезатора частот, сдвигового регистра с обратной связью, цифроаналогового преобразователя и усилителя переменного напряжения. Данное устройство также реализует соответствующий способ измерения полных входных сопротивлений электрических цепей. В патенте RU2092861 представлен способ измерения параметров полного сопротивления и устройство для его реализации, которые позволяют осуществлять одновременное измерение активной и реактивной составляющих полного сопротивления, в том числе двухполюсников, имеющих между полюсами ЭДС, постоянную или медленно меняющуюся во времени. Кроме того, предлагаемые способ и устройство позволяют повысить скорость измерения. В патенте RU2154834 описан способ измерения составляющих полного сопротивления и устройство для его осуществления. Техническим результатом является обеспечение возможности строго одновременного определения значений параметров полного сопротивления в виде непрерывных аналоговых сигналов, динамически адекватных каждому из измеряемых параметров, при исключении необходимости использования управляющих сигналов, частота которых превышает рабочую частоту измерений. В патентах US20030173979, US20020109504, US6581016, US4706041, US4840495, описаны способы и устройства для измерения импеданса, способы измерения и контроль составляющих полного сопротивления и др. В работе Л.И. Герштейна “Оптимальная приемная система акустического детектора РАД”// Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика, 1977, Т.20, С.223-231 описан способ измерения электрической емкости, включенной в измерительный контур высокочастотного резонансного моста. Способ позволяет регистрировать малые относительные изменения

емкости на уровне 10^{-10} – 10^{-11} . Выявленная информация свидетельствует о целесообразности использования одного из известных методов измерения импеданса для реализации предлагаемого в НИР нового способа регистрации электромагнитного излучения.

2.3 Заключение

При проведении патентных исследований осуществлен поиск патентных документов с целью исследования технического уровня и патентоспособности предлагаемого нового способа регистрации электромагнитного излучения, основанного на использовании многослойных наноструктур металл-полупроводник, разрабатываемых в рамках выполнения НИР. Также проведен поиск по научно-технической литературе. Анализ полученной информации показал, что подход, предлагаемый авторами проекта, обладает достаточной степенью новизны и не вступает в конфликт с существующими патентами в России и за рубежом. Это позволяет сделать вывод о целесообразности дальнейшей работы по формированию охраноспособного объекта интеллектуальной собственности.

3 ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫРАЩИВАНИЕ СЕРИИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР

Диод с контактом металл-полупроводник является одним из основных чувствительных нелинейных элементов, используемых при приёме микроволнового излучения. В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн в неохлаждаемых приёмниках у него практически нет конкурентов. Однако сложность строения низкобарьерных диодов не позволяет получить надежные аналитические решения задачи о движении носителей заряда в этих диодах. Без такого описания невозможна оптимизация строения диода, поэтому в настоящей работе проводилось численное моделирование движения носителей (подраздел 3.1). В подразделе 3.2 описана методика выращивания диодных структур газофазным методом с нанесением слоя металла непосредственно в реакторе МОГФЭ.

3.1 Моделирование электронного транспорта в диоде Мотта методом Монте-Карло

3.1.1 Введение

Барьерный контакт металла с полупроводником, имеющий на границе промежуточный нелегированный i слой, называется контактом Мотта [34,35]. После возникновения эпитаксиальных технологий такие контакты нашли применение в микроэлектронике [36-38]. В том числе для детектирования сигналов миллиметрового диапазона длин волн [39]. Работа [39] посвящена микроволновым детекторам, в которых используются диоды Мотта с пониженной эффективной высотой потенциального барьера на границе металл - полупроводник. Эти диоды обеспечивают высокую чувствительность при детектировании без постоянного смещения микроволновых сигналов и являются перспективными для решения различных задач. Понижение эффективной высоты барьера достигается за счет δ -легирования i слоя на расстоянии нескольких нанометров от металла [40,41]. В результате формируется потенциальный рельеф с туннельно-прозрачным барьером на границе с металлом, что уменьшает эффективную высоту барьера диода. Катод диода представляет собой сильно легированный n^+ слой полупроводника (подложку). Энергетическая диаграмма низкобарьерного диода Мотта схематично показана на вставке рис. 3.1. В низкобарьерных диодах Мотта заряд, инжектированный в i слой из контактов, существенно влияет на распределение потенциала, поэтому инжекционные процессы необходимо учитывать при описании электронного транспорта. Эта задача была решена в работе [42] в локально-полевой термоэмиссионно-диффузионной модели. При субмикронной толщине i слоя диода характерный масштаб

неоднородностей потенциала может оказаться сравнимым или меньше длины релаксации энергии электронов. Это приводит к тому, что электроны, достигшие потенциального барьера на границе металл - полупроводник, имеют распределение по энергии, определяемое всей предысторией движения, включая условия прохождения электронов через границу подложка - i слой. Моделирование подобных процессов является весьма сложной задачей. Поэтому целью данной работы было проведение сопоставительного анализа результатов моделирования токопереноса в низкобарьерном диоде Мотта, выполненного с использованием различных моделей, и сравнение расчетных вольт-амперных характеристик (ВАХ) с результатами эксперимента.

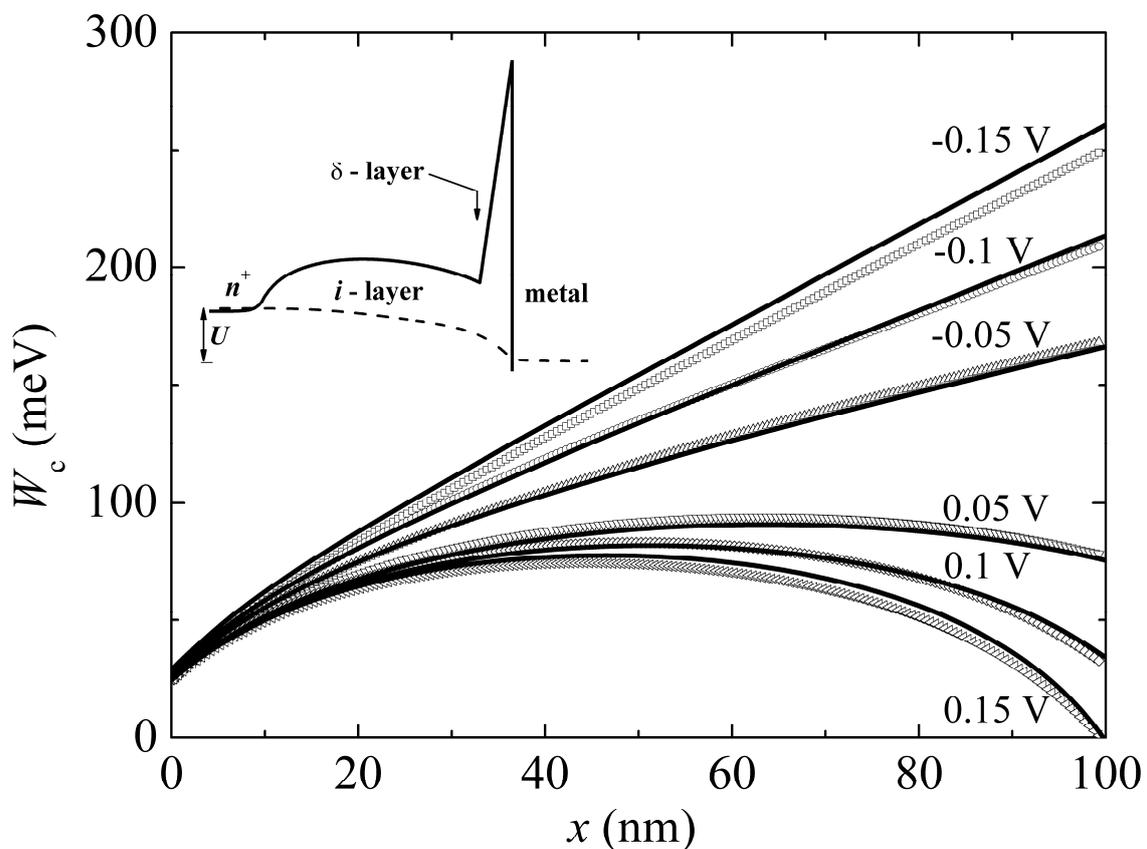


Рисунок 3.1 Положение дна зоны проводимости от координаты в i слое при различных напряжениях на диоде. Линиями показаны зависимости, рассчитанные с помощью аналитического термоэмиссионно-диффузионного подхода из работы [42], символами – зависимости рассчитанные методом Монте-Карло. Энергетическая диаграмма низкобарьерного диода Мотта схематично показана на вставке. Сплошная и штриховая линии показывают положение дна зоны проводимости и электрохимического потенциала соответственно.

3.1.2 Математическая модель

Стандартным методом численного решения кинетического уравнения Больцмана, для описания электронного транспорта в полупроводниках, является метод Монте-Карло [43,44]. Идея подхода состоит в том, что моделируется движение электрона в электрическом поле, прерываемое процессами рассеяния. Распределение времен, в течение которых электрон имеет ту или иную энергию, воспроизводит функцию распределения электронов по энергии. Выбор времени свободного пробега, механизма рассеяния и конечного состояния осуществляется методом случайных испытаний. Вычисление функции распределения носителей заряда по энергии позволяет определить их концентрацию, среднюю энергию и плотность тока. Метод Монте-Карло хорошо зарекомендовал себя при моделировании электронного транспорта в различных устройствах, в том числе в приборах на основе барьерного контакта металл-полупроводник [45-47]. В настоящей работе использовалась самосогласованная математическая модель транспорта электронов на основе метода моделирования Монте-Карло и уравнения Пуассона, определяющего распределение потенциала и электрического поля в приборе. Учитывалось рассеяние носителей тока на ионах примеси, а также на акустических, оптических и междолинных фононах. Предполагалось, что электронный газ в металле и сильно легированной подложке находится в термодинамическом равновесии. Поэтому вбрасывание электронов в активную область прибора производилось со стороны подложки и со стороны металла с параметрами, определяемыми соответствующими равновесными функциями распределения.

Пренебречь отклонением электронного газа от равновесия в подложке, при протекании тока, можно в том случае, если её проводимость достаточно велика [42]. Это предположение позволило исключить из схемы моделирования Монте-Карло движение электронов в обедненном слое подложки, и сделать точкой старта электронов границу раздела n^+ и i слоев. В этом случае распределение стартующих электронов по энергии подчиняется статистике Максвелла-Больцмана. В качестве граничного условия в точке старта для уравнения Пуассона использовалось равновесное соотношение между электрическим полем E и потенциалом ψ :

$$q l E / k T = \sqrt{2} \sqrt{\exp(q \psi / k T) - q \psi / k T - 1},$$

здесь l – длина Дебая, q – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана, T – температура. Потенциал отсчитывается от дна зоны проводимости квазинейтральной области подложки [42].

При достижении частицей потенциального барьера на границе металл - полупроводник разыгрывалась вероятность туннелирования (отражения) электрона через (от) барьер(а). Отражение электрона от потенциального барьера предполагалось зеркальным. Для расчета вероятности туннелирования использовался подход Мерфи и Гуда [48], который ранее уже применялся авторами для моделирования диода Мотта в аналитическом приближении [42,49].

3.1.3 Обсуждение результатов

Расчеты были проведены для низкобарьерного (эффективная высота барьера при нулевом напряжении 0.12 эВ) диода Мотта на основе GaAs с толщиной i слоя 104.7 нм. Концентрация ионов легирующей примеси в i слое составляла 10^{14} см⁻³. Расстояние от δ -слоя до границы с металлом 4.7 нм. Поверхностная концентрация легирующей примеси в δ -слое 8.8×10^{12} см⁻². Уровень легирования подложки 5×10^{17} см⁻³.

Для оценки эффективности предложенных в настоящей работе условий вбрасывания электронов из подложки в i слой, расчет решения задачи проводился как с предложенными, так и со стандартными граничными условиями. В последнем случае точка старта электронов располагалась в подложке на расстоянии трех длин Дебая от границы раздела n^+ и i областей, потенциал и электрическое поле в этой точке считались равными нулю. Благодаря выбору точки старта на границе подложки и i слоя удалось существенно уменьшить количество расчетных итераций, затрачиваемых “впустую”, т.е. на моделирование движения тех электронов, которые отражаются назад в подложку, не достигая i области. Расчет показал, что для предложенных граничных условий, количество частиц, необходимых для получения решения с заданной точностью, снизилось в 3...12 раз в зависимости от величины приложенного к диоду напряжения. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности использования метода Монте-Карло для оптимизации параметров реальных детекторных диодов. Обычно подобное исследование весьма затруднительно из-за больших объемов компьютерных вычислений и ограниченного времени, которое допустимо затратить на проведение таких расчетов.

На рисунках 3.1-3.3 представлены расчетные зависимости положения дна зоны проводимости, электрического поля и концентрации электронов, соответственно, от координаты в i слое при различных напряжениях на диоде U : ± 0.05 , ± 0.1 и ± 0.15 вольт. Отрицательные значения соответствуют обратным приложенным напряжениям,

положительные – прямым напряжениям. Граница i слоя с подложкой расположена в плоскости $x = 0$, δ -слой расположен в плоскости $x = 100$ нм. Линиями показаны зависимости, рассчитанные с помощью аналитического термоэмиссионно-диффузионного подхода из работы [42], символами – зависимости рассчитанные методом Монте-Карло. При выбранных параметрах δ -легирования (концентрации легирующей примеси в δ -слое и его расположении) большая часть напряжения приложена к области туннельного барьера. В области полупроводника вдали от барьера электронный газ близок к равновесию, поэтому отсутствуют эффекты, связанные с разогревом, и соответствующие зависимости, рассчитанные с помощью различных подходов, почти совпадают. Небольшое отличие зависимостей положения дна зоны проводимости при напряжении $U = -0.15$ вольт (рис. 3.1) связано с учетом фонового легирования i слоя (10^{14} см $^{-3}$) при расчете методом Монте-Карло. Подход работы [42], с помощью которого сделан аналитический расчет, требует пренебрежения легированием i слоя. При прямых напряжениях на диоде зависимость положения дна зоны проводимости от координаты в i слое имеет максимум, и перед туннельным барьером возникает потенциальная яма, имеющая минимум энергии в плоскости расположения δ -слоя.

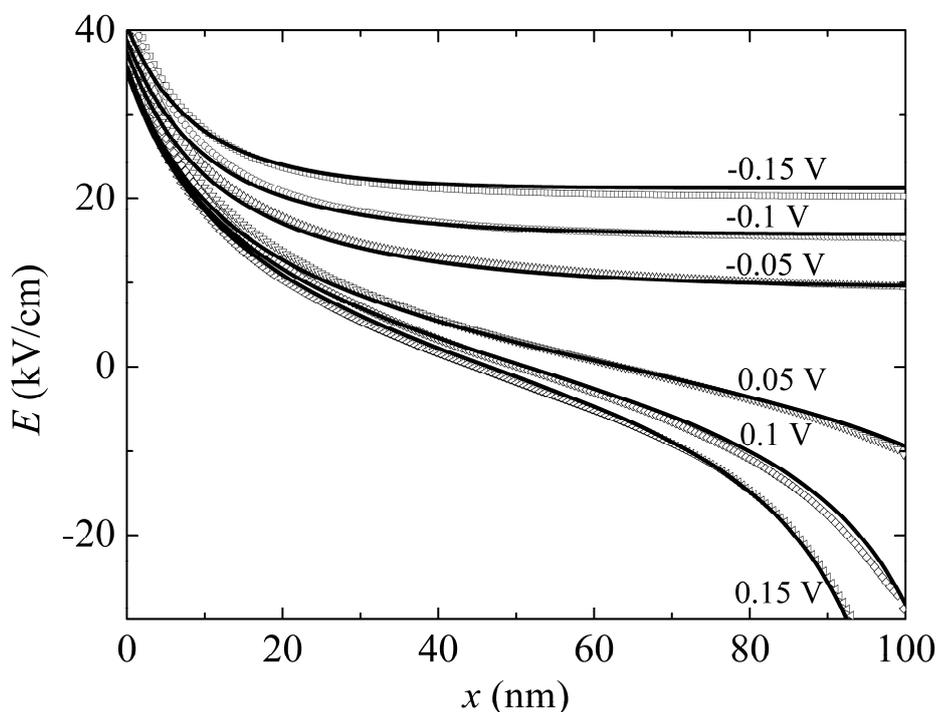


Рисунок 3.2 Распределение электрического поля от координаты в i слое при различных напряжениях на диоде. Линиями показаны зависимости, рассчитанные с помощью аналитического термоэмиссионно-диффузионного подхода из работы [42], символами – зависимости рассчитанные методом Монте-Карло.

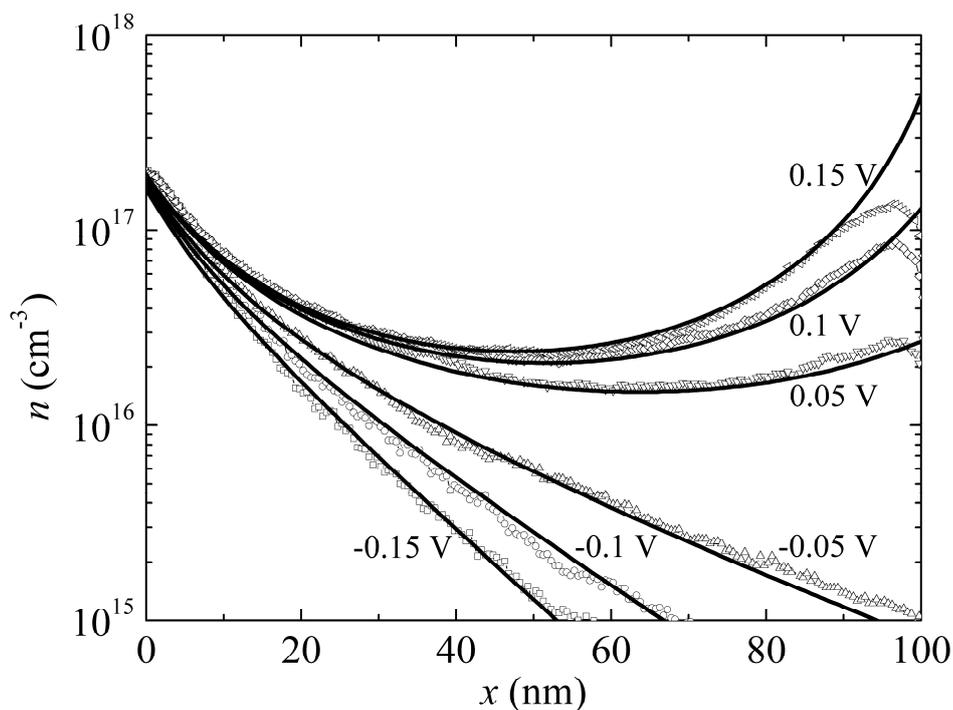


Рисунок 3.3 Распределение концентрации электронов от координаты в i слое при различных напряжениях на диоде. Линиями показаны зависимости, рассчитанные с помощью аналитического термоэмиссионно-диффузионного подхода из работы [42], символами – зависимости рассчитанные методом Монте-Карло.

Электрон,двигающийся над потенциальной ямой, может оказаться в яме, если его энергия релаксирует за счет процессов неупругого рассеяния. Если ширина потенциальной ямы сравнима или меньше длины релаксации энергии, то процесс захвата электрона в яму и обратный процесс выброса из ямы затруднен. Вероятность релаксации энергии электрона в состоянии вблизи минимума потенциальной ямы (а также вероятность обратного процесса выброса из этих состояний) мала, т.к. мала вероятность неупругих процессов рассеяния в соответствующей узкой (по сравнению с длиной релаксации энергии) области i слоя вблизи туннельного барьера. Если к диоду приложено прямое напряжение, электроны могут удаляться из потенциальной ямы за счет туннелирования в металл, причем вероятность этого процесса может оказаться существенно больше вероятности захвата на дно ямы. Таким образом, баланс процессов рассеяния и туннелирования определяют стационарное распределение концентрации электронов в потенциальной яме, которое может сильно отличаться от равновесного. Как видно из рисунка 3.3, концентрация электронов в i слое вблизи туннельного барьера, рассчитанная методом Монте-Карло, оказывается существенно меньше, чем концентрация, рассчитанная с помощью локально-полевого подхода работы [42], в котором длина релаксации энергии равна нулю. С ростом прямого напряжения этот эффект усиливается. Электроны,двигающиеся к туннельному барьеру, ускоряются

электрическим полем потенциальной ямы, а двигающиеся обратно – тормозятся. По этой причине электроны находятся в области δ -слоя в среднем в течение меньшего времени, чем в соседних областях, что немного уменьшает концентрацию электронов в плоскости δ -слоя. Этот эффект проявляется при баллистическом движении электронов, когда он не усредняется процессами рассеяния, поэтому уменьшение концентрации наблюдается вблизи δ -слоя в узкой области толщиной порядка средней длины свободного пробега (рис. 3.3).

На рис. 3.4 приведены вольт-амперные характеристики исследуемого диода. Светлыми квадратными символами показана экспериментальная зависимость, темными круглыми символами – зависимость, рассчитанная методом Монте-Карло, сплошной линией – ВАХ, полученная в термоэмиссионно-диффузионной модели [42].

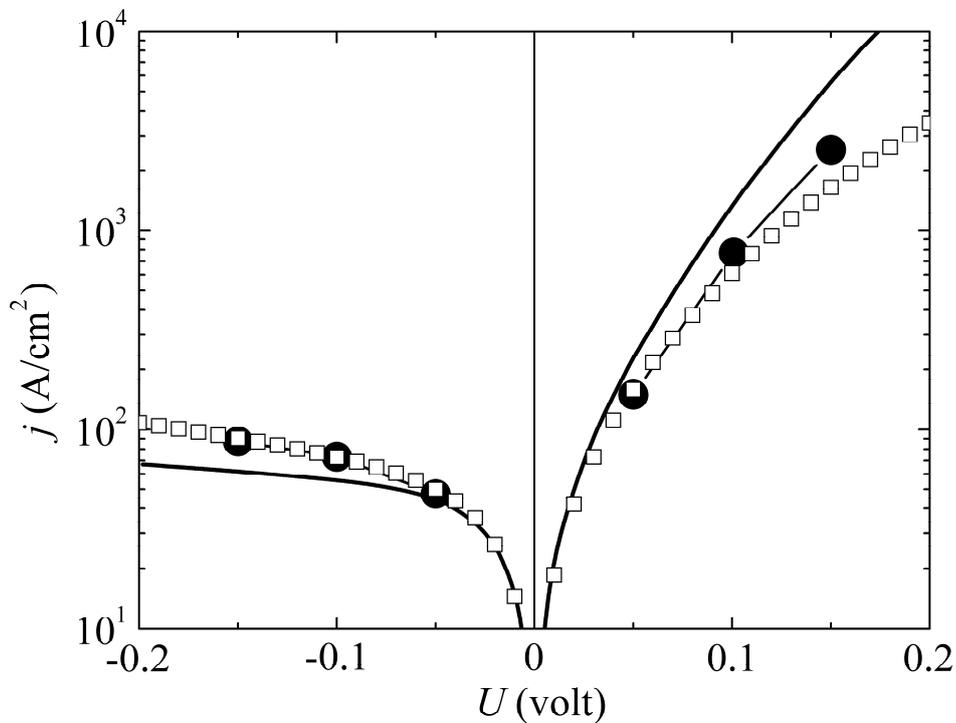


Рисунок 3.4 Вольт-амперные характеристики исследуемого диода. Линиями показаны зависимости, рассчитанные с помощью аналитического термоэмиссионно-диффузионного подхода из работы [42]. Темные символы – зависимости рассчитанные методом Монте-Карло, светлые символу -эксперимент.

Вольт-амперные характеристики, полученные с использованием обеих теоретических моделей, совпадают с экспериментальной зависимостью в области малых напряжений. Таким образом, оба теоретических подхода могут быть использованы для анализа характеристик детектирования низкобарьерного диода, работающего без постоянного смещения. Отличия между собой расчетных зависимостей связаны с обсужденными выше

эффектами. Расчет сделанный методом Монте-Карло хорошо описывает экспериментальную ВАХ во всем рассмотренном диапазоне обратных напряжений. Отличие экспериментальной ВАХ при больших обратных напряжениях от расчетной зависимости, полученной в термоэмиссионно-диффузионной модели, связано, по-видимому, с пренебрежением остаточным легированием i слоя. При больших прямых напряжениях метод Монте-Карло дает завышенные значения тока, причем с ростом напряжения ошибка растет. Неточность расчета, скорее всего, связана с классическим описанием движения электронов в потенциальной яме. При увеличении прямого напряжения на диоде глубина потенциальной ямы растет, и становится необходимым учитывать дискретность энергетического спектра в яме.

На рис. 3.5 показаны энергетические распределения электронов туннелировавших в металл, рассчитанные методом Монте-Карло для различных углов раствора диаграммы направленности пучка электронов, вбрасываемых из подложки в i слой: 10, 30 и 180 градусов. Расчет сделан при напряжении на диоде 0.03 В. Энергия отсчитывается от положения дна зоны проводимости в плоскости δ -слоя. Варьирование угла раствора пучка вбрасываемых электронов влияет на распределение электронов по энергии. Это позволяет управлять свойствами диода (например, эффективной высотой барьера) и будет приводить к изменению ВАХ. Управление направленностью пучка инжектированных электронов может быть осуществлено за счет введения дополнительного туннельно-прозрачного барьера или гетероперехода на границе подложки и i слоя. Подобное управление хорошо зарекомендовало себя в гетероструктурных транзисторах [50].

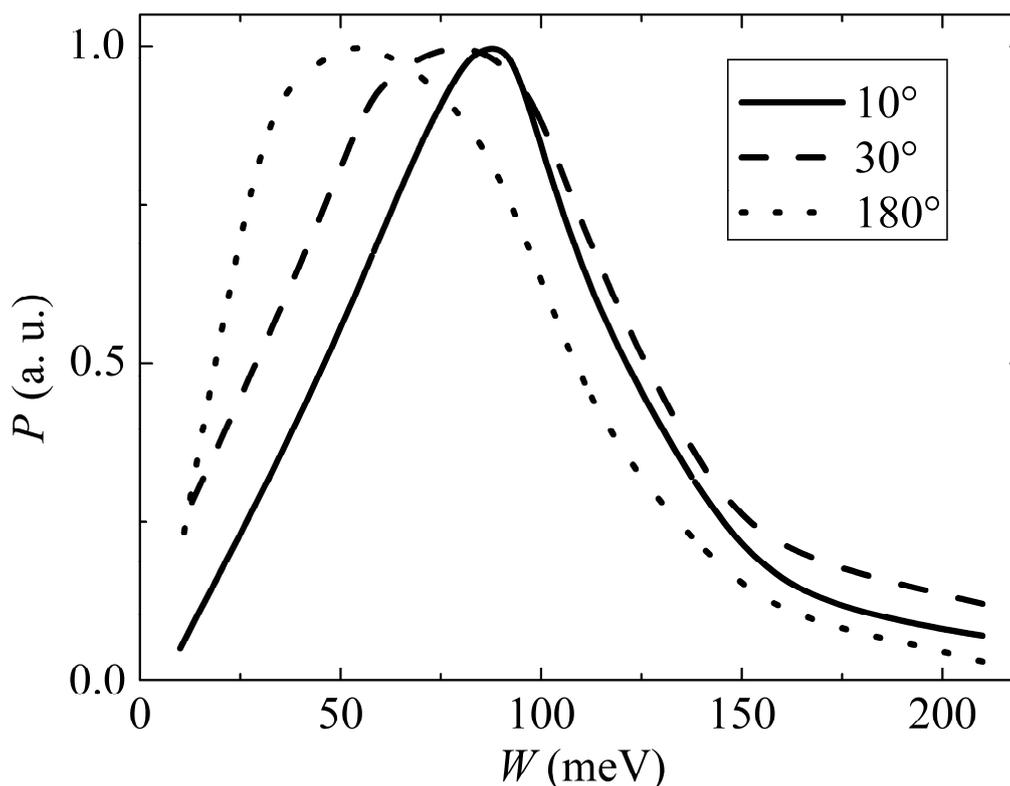


Рис. 3.5 Энергетические распределения электронов, туннелировавших в металл, рассчитанные методом Монте-Карло для различных углов раствора диаграммы направленности пучка электронов, вбрасываемых из подложки в i слой.

3.1.4 Выводы

В работе проведено численное моделирование электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта.

Предложена оригинальная схема метода Монте-Карло, которая позволяет моделировать одновременно как процессы, происходящие в объеме полупроводника, так и контактные явления. Используются граничные условия, позволяющие исключить из рассмотрения область подложки, что существенно повысило эффективность метода за счет снижения объемов вычислений. Это дает возможность проводить моделирование процессов в низкобарьерных диодах Мотта за время, приемлемое для проектирования указанных приборов.

Проведен сопоставительный анализ результатов моделирования токопереноса методом Монте-Карло и с использованием аналитического локально-полевого подхода из работы [42]. Обсуждены различные эффекты.

Показано, что для диодов с тонким i слоем (100 нм) локально-полевой подход неприменим в диапазоне напряжений, при которых распределение потенциала в полупроводнике становится немонотонным.

Проведено сравнение расчетных ВАХ с экспериментальной зависимостью. Расчет сделанный методом Монте-Карло демонстрирует хорошее совпадение с экспериментом при всех напряжениях, при которых потенциальную яму в i слое вблизи туннельного барьера можно считать классической.

Продемонстрировано влияние диаграммы направленности электронов, инжектированных из подложки в i слой, на энергетическое распределение электронов туннелировавших в металл. Этот эффект дает дополнительную возможность управления эффективной высотой низкобарьерного диода Мотта.

3.2 Методика изготовления планарно-ориентированных низкобарьерных диодов Мотта миллиметрового диапазона длин волн

Диод с контактом металл-полупроводник (МП) является одним из основных чувствительных нелинейных элементов, используемых при приёме микроволнового излучения. В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн в неохлаждаемых приёмниках у него практически нет конкурентов [51,52]. Однако в ряде случаев было бы желательно уменьшить эффективную высоту барьера контакта МП (Δ) и, тем самым, получить детектор сигналов или умножитель частоты, работающие без постоянного смещения. Следует ожидать, что в отсутствие тока смещения будет снижен уровень шумов. Очевидным способом снижения эффективной высоты барьера контакта МП является обеспечение высокой туннельной прозрачности вблизи вершины потенциального барьера при сильном неоднородном легировании полупроводника вблизи контакта с металлом [53-56]. Особенностью используемой в настоящем проекте технологии является непрерывный процесс внутри одного реактора. Легированный кремнием тонкий δ -слой и верхний слой металла (алюминий) наносятся в реакторе металлоорганической газофазной эпитаксии за счет подачи газов-источников и их разложения над нагретой подложкой. Это обеспечивает высокое качество гетеропереходов.

Рост эпитаксиальных слоёв GaAs и осаждение металлических плёнок алюминия для формирования барьерного контакта проводили в установке металлоорганической эпитаксии (МОГФЭ) при пониженном давлении в реакторе (100 мбар). В качестве подложек использовали сильнолегированные пластины n^+ -GaAs, разориентированные на 2° от направления (100). Температура роста слоёв GaAs составляла 650°C .

Последовательность слоёв была следующая. Сначала на подложку осаждали сильнолегированный буферный слой n^+ -GaAs толщиной $0,1 \div 0,3$ мкм с концентрацией носителей $(4 \div 6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем около $0,1$ мкм нелегированного (концентрация $\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) GaAs. Из-за малого легирования электрическое поле в этом слое является практически однородным, что является характерным для диодов Мотта [57]. Далее проводили формирование сильнолегированной приповерхностной области полупроводника. В режиме прерывания роста проводили δ -легирование кремнием с поверхностной концентрацией $(5 \div 20) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, затем проводили осаждение покрывающего слоя нелегированного GaAs толщиной $4 \div 5$ нм. В ряде случаев поверх δ -слоя осаждали комбинацию нелегированных слоёв GaAs (2 нм) и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($2 \div 3$ нм, $x=0,2 \div 0,4$), имеющих ту же суммарную толщину. Вместо InGaAs возможно осаждение слоёв узкозонных материалов GaAsN или InGaAsN. Введение слоя узкозонного полупроводника на границе металл-полупроводник дополнительно уменьшает высоту потенциального барьера и увеличивает его туннельную прозрачность. Это позволяет для достижения минимальных значений Δ использовать δ -легирование с поверхностной концентрацией вблизи нижней границы диапазона $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Далее температуру в реакторе снижали примерно до 175°C и без нарушения ростовых условий в реакторе МОГФЭ проводили осаждение плёнки алюминия толщиной $0,1 \div 0,15$ мкм, используя в качестве источника металлоорганическое соединение - диметилэтиламиноалан [58]. Благодаря относительно невысокому уровню δ -легирования вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов соответствовали обобщённой теории токопереноса [59] даже при минимальных значениях $\Delta \sim 0,14$ эВ.

4 ПРОВЕДЕНИЕ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИОБРЕТАЕМОМУ ОБОРУДОВАНИЮ. ОБЪЯВЛЕНИЕ ТЕНДЕРОВ НА ЗАКУПКУ ОБОРУДОВАНИЯ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДОГОВОРА (КОНТРАКТА) С ПОСТАВЩИКОМ НА ЗАКУПКУ ОБОРУДОВАНИЯ. ПРОВЕДЕНИЕ АВАНСОВЫХ ПЛАТЕЖЕЙ

В соответствии с общей направленностью работ, выполняемых по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» в рамках мероприятия 5.2, основной объем финансирования настоящего проекта (более 70%) предназначен для развития Центра коллективного пользования ЦКП ИФМ РАН, а именно, для закупки современного спецоборудования. Выполненные по этому направлению работы включают в себя маркетинговые исследования (они отражены в подразделе 4.1), формирование технических заданий, объявление тендеров, заключение контрактов на поставку (подраздел 4.2).

4.1 Маркетинговые исследования по закупаемому спецоборудованию

4.1.1 Рентгеновский дифрактометр

Рентгеновская дифрактометрия (XRD) - оперативный и высокоинформативный метод анализа эпитаксиальных слоев. В настоящее время на имеющемся оборудовании в ЦКП ИФМ РАН выполняется анализ структур, выращенных в реакторах молекулярно-пучковой, газофазной эпитаксии, лазерного и магнетронного напыления, несколько сот образцов в год с 10 реакторов ИФМ РАН, НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ИХВВ РАН, ИПФ РАН и ряда предприятий города Нижнего Новгорода. Типы структур весьма разнообразны: сверхрешетки и структуры с квантовыми ямами и квантовыми точками на основе полупроводниковых твердых растворов GeSi, AlGaAs, InGaAs, InGaP, AlGaN для диодных, транзисторных, лазерных и микромеханических приложений; слои высокотемпературных сверхпроводников YBCO для высокочастотных резонаторов и стандартов напряжений; разнообразные монокристаллические подложки и буферные слои. По данным XRD от тестовых образцов производится калибровка потоков в реакторах эпитаксиального роста, с чем связано требование оперативности исследований.

Требования к исследованиям постоянно повышаются, требуется, в частности:

- 1 повысить угловое и спектральное разрешение (это повышает предельную длину когерентности решетки исследуемых структур);
- 2 повысить интенсивность рентгеновского пучка (это увеличивает длину спектра когерентного рассеяния и ведет к увеличению разрешения по глубине);

- 3 повысить чувствительность к приповерхностным тонким слоям;
- 4 обеспечить возможность построения полюсных фигур для анализа текстурированных образцов;
- 5 обеспечить возможность съемки 2-мерных сечений обратного пространства за время менее 1 часа для анализа частично релаксированных слоев;
- 6 обеспечить возможность съемки на малых углах методами рентгеновской рефлектометрии;
- 7 совместить эти возможности в одном приборе с быстрой перестройкой из одного режима в другой.

Современные модели рентгеновских лабораторных дифрактометров удовлетворяют перечисленным требованиям. Этого удастся добиться за счет целого ряда новых технических решений:

- 1 используются бездисперсионные монохроматоры с 4-х кратным отражением и анализаторы с 3-х кратным отражением;
- 2 перед кристалл-монохроматором используются параболическое многослойное зеркало, которое собирает расходящийся пучок в параллельный (из 1° в 0.05°), что повышает интенсивность пучка после монохроматора;
- 3 рентгено-оптическая схема позволяет использовать скользящие углы падения и отражения вблизи углов полного внешнего отражения, что повышает чувствительность к приповерхностным слоям;
- 4 прецизионный гониометр с поворотом по нескольким осям, ω , φ , χ , θ , обеспечивает возможность построения полюсных фигур;
- 5 применение в моделях последнего года выпуска линейных детекторов позволило проводить одновременную регистрацию спектров в достаточно большом интервале углов θ , что существенно сократило время регистрации 2-мерных сечений обратного пространства;
- 6 имеется вариант узкого параллельного пучка для рефлектометрии и программы обработки этих данных;
- 7 в новых моделях отдельные блоки рентгено-оптической схемы легко заменяются без юстировки прибора, что делает прибор высоко универсальным.

Имеется и целый ряд других важных особенностей, например, держатель образцов с горизонтальным расположением. Особенно это важно для мелких или сыпучих образцов, крепление которых в вертикальной плоскости затруднено. За счет надежной радиационной защиты и автоматизации управления, включая этап юстировки образца, прибор стал безопасным для персонала в радиационном отношении.

Предварительный маркетинговый анализ показал, что в 2011 году конкурирующими здесь являются следующие марки дифрактометров:

- EMPYREAN, выпускаемый фирмой PANalytical, Голландия, (бывшая PHILIPS Analytical);
- D8 DISCOVER, выпускаемый фирмой BRUKER AXS Analytical X-ray System GMBH.

Обе фирмы имеют свои представительства в России. В России аналогов не выпускается. В ходе маркетинговых исследований в рамках проекта был выполнен дополнительный сравнительный анализ этих марок приборов. Он показал, что приборы остаются "объектно-ориентированными" по своей базовой компоновке и комплектации. Не все режимы совместимы в одном приборе, и не реальна закупка полного набора дорогостоящих сменных блоков. Необходимо было выбрать приоритетные типы анализируемых образцов и совместно с фирмой-производителем выработать компромиссный вариант комплектации прибора. Эта работа была выполнена, исходя из задач ЦКП, по техническим характеристикам и соотношению цена-качество. На основе этого анализа сформулировано Техническое задание (см. Приложение ТЗ), включенное в "Документацию об открытом аукционе в электронной форме № 24 на право заключения договора поставки рентгеновского дифрактометра для нужд ИФМ РАН в 2011 году".

Отдельно в текст "Документации" было включено требование к заявкам (вторая часть заявки) представить копии документов, подтверждающих соответствие товара требованиям, установленным в соответствии с законодательством Российской Федерации: «Свидетельство об утверждении типа средств измерения» на предлагаемый тип средств измерения, «Санитарно-эпидемиологическое заключение» на предлагаемый прибор, использующий рентгеновское излучение. Это требование было обращено против недобросовестных участников электронных торгов, которые не имеют связей с производителем товара, а предлагают искусственно заниженные цены, либо несуществующий товар.

4.1.2 Установка лазерной литографии

В Институте физики микроструктур РАН и действующем на его основе Центре коллективного пользования "Физика и технология микро- и наноструктур" активно ведутся научные исследования полупроводниковых, металлических и сверхпроводящих гетеро- и наноструктур. Одним из важнейших этапов формирования лабораторных образцов микро- и наноструктур является фотолитография, ориентированная на создание единичных образцов наноструктур.

Требования к такой установке:

- возможность формировать любые изображения в фоторезисте с минимальными размерами до 1 мкм без использования фотошаблонов, формируя рисунок графическими средствами компьютера;
- автоматическое послойное совмещение;
- возможность формирования 3D структур;
- работа с образцами и кусками пластин нестандартных размеров и неправильной формы;
- компактность.

Предварительный маркетинговый анализ показал, что этим требованиям удовлетворяет установка бесконтактной лазерной литографии μ PG101 (лазерный генератор изображения) компании Heidelberg (Германия).

4.1.3 Источник бесперебойного питания

Для обеспечения бесперебойной работы в ЦКП ИФМ РАН нового просвечивающего электронного микроскопа LIBRA 200, монтаж которого и ввод в эксплуатацию намечен на 2011 г., была необходима компактная трехфазная система защиты электропитания с масштабируемым временем автономной работы, минимальной резервируемой мощностью 24 кВт, On-Line типа, с масштабируемой системой батарей, обеспечивающей возможность горячей замены отдельных модулей.

Основные технические характеристики ИБП определяются требованиями микроскопа LIBRA 200:

- Номинальное входное напряжение – до 400 В
- Входная частота, Гц – 50
- Максимальный ток нагрузки, А – до 41
- Тип входного соединения - Hard Wire 5-wire (3PH + N + G)
- Форма выходного сигнала, при работе от батарей – Синусоидальная
- Номинальное выходное напряжение при работе от батарей, В – 380
- Выходная частота (при работе от батарей), Гц - 47-53 для номинала в 50Гц
- Искажения выходного сигнала, % - +/-5% при полной нагрузке
- Тип выходного соединения - Hard Wire 5-wire (3PH + N + G)
- Время работы от батарей, при 50% нагрузке – не менее часа
- Наличие обходного режима (bypass)
- Рабочий диапазон температур, С – 15-35
- Рабочий диапазон относительной влажности, % - 35-65

- Уровень акустического шума на расстоянии 1 метра от поверхности устройства – не более 60 дБА.

Этим требованиям удовлетворяла модель Smart-UPS VT 30kVA, производитель: APC (сайт производителя - <http://www.apc.ru>) и ее аналоги.

На основе этого анализа было сформулировано Техническое задание (см. Приложение ТЗ), включенное в "Документацию об открытом аукционе в электронной форме № 12 на право заключения договора поставки источника бесперебойного питания".

4.1.4 Высоковакуумная установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности

Анализ работы ЦКП ИФМ РАН за последние годы показал недостаточное приборное обеспечение контроля процессов формирования многослойных наноструктур (Si, GaAs, GaN и других) *in situ*, непосредственно в реакторах напыления без вынесения на воздух, в вакуумном объеме реактора. Во многих случаях такие исследования дают уникальную информацию, без которой невозможна отработка процессов нанесения слоев, и которую невозможно получить на образцах, извлеченных из реактора на воздух, где происходит быстрая деградация поверхностных слоев.

Вторая, и очень важная для развития ЦКП область, в которой наметилось явное отставание, - это метрологическое обеспечение приборов, методик и контрольных образцов.

С целью преодоления этих недостатков, тормозящих развитие ЦКП ИФМ РАН, было решено приобрести "Установку исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности" отечественного производства, которая имела бы высокий уровень метрологического обеспечения: метрологически поверенные приборы с сертификатом средства измерения, аттестованные методики и контрольные образцы. Аттестованные образцы могут быть использованы при аттестации методик измерения на других, уже имеющихся измерительных приборах ЦКП ИФМ РАН, что обеспечит существенное продвижение ЦКП в его метрологическом обеспечении.

Установка предназначена для исследования методами микроскопии нанометрового разрешения процессов формирования или модификации поверхности многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур непосредственно в динамике создаваемого в этой установке процесса их плазменного напыления или перепыления, в том числе с контролем

шероховатости и качества их поверхности как внутри, так и вне плазмы установки. Имеется большой набор базовых режимов установки: оптическая дальнефокусная неинверсная микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия (STM), атомно-силовая контактная микроскопия (AFM), вибрационная (бесконтактная и полуконтактная) атомно-силовая микроскопия (VAFM), магнетронно/плазменное напыление/перепыление, контактная профилометрия в виде прибора контроля шероховатости и качества поверхности. Дополнительные режимы: сканирующая туннельная микроскопия постоянной высоты (CH-STM), сканирующая туннельная спектроскопия (STS-STM), сканирующая туннельная микроскопия электролюминесцентных свойств образца (EL-STM), спин-поляризованная сканирующая туннельная микроскопия малых магнитных полей (SP-STM), литография в режиме сканирующей туннельной микроскопии (STM-LIT), атомно-силовая микроскопия постоянной высоты (CH-AFM), атомно-силовая микроскопия высоких магнитных полей образца (M-AFM), атомно-силовая микроскопия электропроводности и электрических потенциалов образца (EAFM), атомно-силовая микроскопия теплопроводности и температуры образца (T-AFM), атомно-силовая микроскопия тензора пьезосвойств и магнитострикции образца (PF-AFM), атомно-силовая микроскопия упругих свойств образца (FM-AFM), Атомно-силовая микроскопия трения на поверхности образца (LF-AFM), атомно-силовая микроскопия вертикальной вязкости образца (VV-AFM), атомно-силовая микроскопия латеральной вязкости поверхности образца (LV-AFM), атомно-силовая микроскопия адгезионных свойств образца (AD-AFM), атомно-силовая микроскопия акустических свойств образца (A-AFM), атомно-силовая микроскопия электрических полей на поверхности образца (EF-AFM), литография в режиме атомно-силовой микроскопии (AFM-LIT), вибрационная атомно-силовая микроскопия постоянной высоты (CH-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия фазового контраста (PH-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия пьезосвойств и магнитострикции образца (PF-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия средних магнитных полей образца (M-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия электрических потенциалов образца (EP-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия емкостей поверхности образца (C-VAFM), вибрационная атомно-силовая микроскопия зарядов и потенциалов поверхности образца методом зонда Кельвина (KP-VAFM), литография в режиме вибрационной атомно-силовой микроскопии (VAFM-LIT).

Имеется сертификат о внесении в Госреестр СИ по степени точности не ниже 1-й степени со сроком действия не менее апреля 2016 года, наличие свидетельства о поверке.

Методики в комплекте поставки установки:

- Методика 1 сканирующей туннельной микроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 2 атомно-силовой микроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 3 сканирующей туннельной спектроскопии Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 4 электрофизических измерений Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 5 нанолитографии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 6 магнито-резонансной и магнито-статической микроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 7 силовой модуляционной микроскопии для изучения упругости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 8 вискозиметрической сканирующей микроскопии для изучения вязкости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 9 адгезионной сканирующей микроскопии в установках для изучения адгезионной способности многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 10 исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами оптической и зондовой микроскопии в процессе плазменного напыления или перепыления;
- Методика 11 изучения ферромагнитных и пьезоэлектрических свойств Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика 12 микрозондовой трассирующей щуповой диагностики для полноразмерного предварительного контроля морфологических параметров многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур с точностью 10нм.

Методики метрологической поверки установки с эталонными образцами:

- Заверенная государственными органами сертификации методика метрологической поверки встроенной высоковакуумной плазменно-стойкой головки зондового микроскопа,
- Заверенная государственными органами сертификации методика метрологической поверки внеплазменного зондового микроскопа контроля качества поверхности образцов,
- Заверенная государственными органами сертификации методика метрологической поверки внеплазменного профилометра контроля шероховатости поверхности образцов
- Средства поверки установки в виде эталонов или мер, имеющие сертификат введения их в Госреестр СИ со сроком действия не менее апреля 2016 года, прошедшие Госповерку и имеющие свидетельства о поверке.

На основе проведенного анализа было сформулировано Техническое задание (см. Приложение ТЗ), включенное в "Конкурсную документацию (открытый конкурс №22) на право заключения договора на поставку оборудования для научных исследований".

4.1.5 Система напыления и быстрого термического отжига контактов

При выполнении измерений электрических параметров образцов разных типов в ЦКП ИФМ РАН требуется хорошо воспроизводимое формирование надежных электрических контактов, а также тонких и ультратонких диэлектрических слоёв и металлических высокого структурного качества.

В эти задачи входит напыление различных металлов (как легко испаряемых так и тугоплавких) и быстрое вжигание контакта для сохранения неизменных электрических свойств образцов. Общие требования к установке:

1. Несколько процессов физического вакуумного осаждения (PVD) включая резистивное термическое испарение (RTE), магнетронное распыление (MSD, магнетрон постоянного тока) и испарение электронным лучом (EBD);
2. Рабочая камера из нержавеющей стали со смотровым окном (фронтальная загрузка);
3. Быстрая откачка (криогенный высоковакуумный насос 1500 л/с с компьютеризированным манометрическим контролем вакуума);
4. Режим соосаждения из разных источников;
5. Контроль скорости испарения и осаждения (мониторинг толщины);
6. Сменные используемые подложки до 100 мм;
7. Вращающийся столик-подложкодержатель с возможностью охлаждения диаметром 150 мм;
8. Нагреватель подложек от комнатной температуры до 600 С;
9. Полностью автоматизированная система контроля параметров и управления процессами SCADA на базе Windows 7 Professional включая ПК и соответствующие интерфейсные устройства.
10. Входное напряжение 220 В; 12. Сертификация; 11. Обучение работе на установке и пусконаладка.

Маркетинговый анализ показал, что оптимальным вариантом с точки зрения технологических возможностей установки, совместимости с условиями эксплуатации в ИФМ РАН (вес, габариты, чистота процессов), доступности и сопровождение (российское представительство, поставщик) и цены может быть установка Amod производства фирмы Angstrom Engineering Inc. (Канада) в специально проработанной со специалистами фирмы комплектации.

4.1.6 Станция ожижения гелия с системой сбора и наполнительной рампой

Активно ведущиеся в ИФМ РАН экспериментальные исследования полупроводниковых, сверхпроводящих и ферромагнитных структур, а также гибридных структур в широком интервале температур и при наличии сильного магнитного поля требуют все более активного использования современных криостатов, охлаждаемых жидким гелием. Отметим, что спектр криогенного оборудования в ИФМ РАН постоянно расширяется. Так, например, в конце 2009 года был приобретен гелиевый криостат производства компании РТИ (Россия) с соленоидом на 14 тесла, а к концу 2011 году будет поставлен сверхвысоковакуумный низкотемпературный сканирующий туннельный микроскоп производства компании Омикрон (Германия). К сожалению, в настоящее время в ИФМ РАН отсутствует система сбора и ожижения гелия, что приводит к значительным потерям гелия при проведении низкотемпературных исследований и вынуждает исследователей составлять график проведения экспериментов в соответствии с графиком работы внешних организаций производящих жидкий гелий, что является крайне неудобным. Для существенного снижения издержек представляется необходимым установить систему сбора гелия и закупить автономную станцию ожижения гелия.

Основные требования к системе сбора и ожижения гелия:

1. Возможность автоматической круглосуточной работы станции при минимальном участии оператора.
2. Возможность получать несколько десятков литров жидкого гелия в сутки при использовании системы сбора газообразного гелия. Отметим, что слишком большая производительность (свыше 100 литров в сутки) будет скорее недостатком, т.к. имеющееся криогенное оборудование не сможет потреблять такое количество гелия постоянно.
3. Совместимость с имеющимся газовым и криогенным оборудованием, в частности, с транспортными дьюарами и стандартными баллонами для газообразного гелия.
4. Наличие компрессора и гелиевого газгольдера.
5. Низкое энергопотребление.
6. Наличие в Российской Федерации фирмы, производящей сервисное обслуживание и, при необходимости, ремонт установки.

Современные модели станций ожижения гелия удовлетворяют перечисленным требованиям. В качестве возможной станции ожижения может быть рассмотрена портативная станция для ожижения гелия LHeP18 на базе криорефрижератора PT415 с производительность 18 л/сутки производства компании Cryomech (США). В состав такой

станции входит сосуд дьюара 150 л с головкой криорефрижератора, гелиевый компрессор CP1010 (водяное охлаждение) с функцией контроля температуры криоголовки, сверхпроводящий уровнемер с монитором, электронный прессостат (блок поддержания избыточного давления в дьюаре). В России аналогов таких портативных станций не выпускается. В ходе маркетинговых исследований в рамках проекта выполнен дополнительный сравнительный анализ этой модели с ожижительными станциями других производителей и составлено ТЗ.

4.1.7 Сверхпроводящая магнитная система замкнутого цикла на базе криогенного рефрижератора

Исследование термодинамических, низко- и высокочастотных транспортных свойств низкоразмерных сверхпроводниковых (например, Nb), ферромагнитных (например, Co, Fe, пермаллой) и полупроводниковых (таких как Ge/Si, InAs/GaAS) структур, новых сверхпроводящих соединений на основе Fe, а также гибридных гетероструктур сверхпроводник-ферромагнетик (например, Nb/Co) являются одним из основных научных направлений в ИФМ РАН. Для изучения электрофизических свойств таких структур необходимо исследование особенностей магнитосопротивления (зависимости электрического сопротивления образца от приложенного магнитного поля) и вольт-амперных характеристик в широком температурном интервале при наличии магнитного поля. Покупка современного криостата замкнутого цикла позволила бы существенно расширить класс изучаемых соединений и спектр решаемых задач. Проведенные маркетинговые исследования показали, что использование криогенных систем замкнутого цикла Гиффорда-МакМагона, не потребляющих жидкий гелий при первоначальном охлаждении системы и во время работы, представляется весьма перспективным и позволяет проводить экспериментальные исследования с малыми финансовыми затратами на покупку сжиженных газов.

Основные требования к системе:

1. Рабочий диапазон температур образца – от 1.6 К до 300 К, достижимый в системе замкнутого цикла.
2. Рабочий диапазон магнитных полей соленоида – до 8 тесла в системе замкнутого цикла с теплым объемом внутри соленоида.
3. Источник тока для питания сверхпроводящего соленоида.
4. Возможность управления системой с помощью персонального компьютера.
5. Низкий уровень вибраций.

6. Возможность автономной работы без потери хладагента в течение длительного времени.

7. Наличие в Российской Федерации фирмы, производящей сервисное обслуживание и, при необходимости, ремонт установки.

Современные криомагнитные системы замкнутого цикла удовлетворяют этим условиям. В качестве одного из возможных вариантов может быть рассмотрена сверхпроводящая магнитная система на базе криогенного рефрижератора CFM 8T VTI с контроллером температуры для исследования транспортных свойств нормальных, сверхпроводящих и ферромагнитных образцов в широком температурном интервале (1.6-300 К) во внешнем магнитном поле (до 8 Тл) производства компании Cryogenic Ltd. (Великобритания). В ходе маркетинговых исследований в рамках проекта выполнен дополнительный сравнительный анализ этой модели с системами замкнутого цикла других производителей (Oxford Instruments, Janis и др.) и составлено ТЗ.

4.1.8 Атомно-силовой микроскоп для изучения шероховатости криволинейных оптических поверхностей в средне- и высоко-частотных диапазонах с субангстремной чувствительностью

Проблема аттестации дефектов формы сверхгладких (шероховатость субнанометрового уровня) поверхностей в широком диапазоне пространственных частот - важная часть целого ряда задач современной коротковолновой оптики (ультрафиолетовое, экстремальное ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение). При изготовлении оптических элементов для приборов и систем изображающей оптики дифракционного качества (пространственное разрешение определяется дифракцией света), востребованных для современной нанолитографии, микроскопии, лазерной техники специального назначения, систем глобального наблюдения за поверхностью земли, требования на допустимые дефекты (шероховатости) поверхности составляют 3-5 ангстрема в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^3$ мкм⁻¹ (диапазон латеральных размеров от метра до 1 нм). Если в диапазоне пространственных частот $10^{-6} - 10^{-3}$ мкм⁻¹ (в оптике дефекты поверхности в этом диапазоне относят к дефектам формы) разработанные в последние годы интерферометры с дифракционной волной сравнения обеспечивают требуемую точность измерений, то в области частот $10^{-3} - 10^3$ мкм⁻¹ (дефекты поверхности в этом диапазоне называю среднечастотными и высокочастотными шероховатостями) результаты измерений, выполненные в различных группах с использованием одних и тех же методов, дают противоречивые результаты.

Традиционно для измерения шероховатостей в коротковолновом диапазоне используют атомно-силовую микроскопию (АСМ). Анализ рынка АСМ показал, что все образцы микроскопов позволяют изучать только плоские детали, в то время как изображающая оптика имеет кривые поверхности. Изучение неплоских поверхностей требует применения нестандартных схем использования микроскопов, в ущерб точности измерений и с риском повреждения дорогостоящих оптических деталей.

Шероховатости среднечастотного диапазона измеряются с помощью оптической интерференционной микроскопии (ОИМ). Однако, как было показано в последних исследованиях, проведенных в ИФМ РАН и подтвержденных в Rigaku Innovative Technologies (США), из-за наличия эталонных поверхностей в конструкции интерферометров, а так же из-за прохождения световых пучков через оптические элементы, где они неконтролируемым образом набирают дополнительные набеги фаз, этот метод не удовлетворяет современным требованиям по точности измерений.

Для решения этой проблемы нами было предложено компании NT-MDT разработать модификацию АСМ, оснащенного столом с 5-ю степенями свободы для массивных образцов с параметрами:

- максимальный диаметр не менее 300 мм,
- максимальная толщина не менее 70 мм,
- максимальная стрела прогиба не менее 40 мм
- максимальное поле зрения не менее 1000 мкм.

После проведения патентных исследований, NT-MDT признала данную разработку не имеющей мировых аналогов и представляющей значительный рыночный потенциал в оптической промышленности, и для исследований по физике поверхности и твердого тела. Была подтверждена техническая реализуемость на базе решений и технологий компании. Разработано техническое задание.

4.1.9 Генератор сигналов серии 50 GHz

В настоящее время в ЦКП ИФМ РАН проводятся научно-исследовательские работы, для осуществления которых требуется генератор сигналов синтезаторного типа с высокой стабильностью частоты в диапазоне до 50 ГГц и выходной мощностью выше 10 мВт. В частности, это работы:

- исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках. В зависимости от мощности входного сигнала, которая должна быть более 5 мВт, и частоты сигнала измеряется мощность гармоник в терагерцовом диапазоне;

- спектрометрические исследования внутримолекулярных энергетических переходов, гигагерцового и терагерцового диапазонов частот. Для стабилизации частоты сигнала возбуждающего излучения применяются опорные синтезаторы диапазона до 50 ГГц. Такие же синтезаторы применяются в качестве гетеродина супергетеродинного спектрометра с гармоническим смесителем;

- подавление помех в измерительной аппаратуре с помощью фильтров с динамическим диапазоном более 100дБ. Для измерения АЧХ и настройки таких фильтров требуются генераторы с высокой стабильностью частоты и большой мощностью выходного сигнала. Маркетинговое исследование показало, что наиболее подходящим генератором сигналов для наших работ является генератор сигналов серии PSG компании Agilent Technologies E8257D-550 (Frequency range from 250 kHz to 50 GHz) с опцией 1EU. Стоимость поставки 3.0 млн. руб. При этом прибор подпадает под ограничения, действующие в США, и требуется разрешение Госдепартамента США на его поставку.

4.2 Формирование заявок по закупаемому спецоборудованию, объявление тендеров и заключение контрактов на поставку

В Таблице 4.1 отражены работы по закупке спецоборудования, выполненные на этапе 1. Размещение заявок в системе электронных торгов началось непосредственно после получения аванса по госконтракту. Объем закупок соответствует выделенным на 2011 год средствам по статье спецоборудование. В частности, оборудование поз. 3 и 4 со сроками поставки до сентября 2011 было получено.

Таблица 4.1 Список спецоборудования, которое закупается для ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур» по ГК № 16.552.11.7007 в 2011 году

№	Наименование	Дата размещения заявки в системе электронных торгов	Контракт на поставку		
			Номер и дата заключения контракта	Марка и цена прибора, млн. руб.	Срок поставки по контракту
1	Рентгеновский дифрактометр для анализа полупроводниковых кристаллических образцов.	03.06.2011 Аукцион №24	24/140 от 18.07.2011	Bruker D8 Discovery 21.7	До 30 ноября 2011
2	Лазерный генератор микро-изображений на основе подвижного столика и литографирующего	10.06.2011 Аукцион №19	19/140 от 18.07.2011	μPG101 9.8	До 25 ноября 2011

	лазера				
3	Источник бесперебойного питания для нового просвечивающего микроскопа	08.06.2011 Аукцион №25	25/140 от 12.07.2011	Smart-UPS VT 30kVA 0.46	До 25 июля 2011 (выполнено)
4	Высоковакуумная установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности ВАК. Часть 1.	02.06.2011 Конкурс №22	22/140 от 18.07.2011	СММ-2000. 9.5 (часть 1 2011 год)	август 2011 (выполнено)

Копии извещений о размещении заявок в системе электронных торгов и копии заключенных контрактов прилагаются.

5 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ СТОРОННИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

5.1 Общие подходы к проведению исследований в интересах сторонних организаций в ЦКП ИФМ РАН

В соответствии с действующим «Положением о Центре коллективного пользования научным оборудованием “ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР” (ЦКП ИФМ РАН)», документ прилагается, основным направлением деятельности ЦКП является обеспечение доступа заинтересованным организациям и исследовательским группам к современному дорогостоящему научному оборудованию для проведения исследований на условиях центра коллективного использования, а также оказание услуг исследователям и научным коллективам как базовой организации, так и иным заинтересованным пользователям. Основные научные направления ЦКП: физика поверхности, физика твердотельных наноструктур, физика сверхпроводников, многослойная рентгеновская оптика, а также технология и применение тонких пленок, поверхностных и многослойных структур.

Взаимодействие со сторонними организациями организовано следующим образом. Заявки на выполнение услуг направляются по электронной почте или в бумажном виде на адрес руководителя ЦКП. По результатам рассмотрения заявки с учетом степени соответствия возможностям оборудования ЦКП и времени работы оборудования руководитель ЦКП принимает решение о возможности заключения договора на проведение научных работ и оказание услуг и включает заявку в план работ ЦКП. Возможность допуска физических лиц - представителей заинтересованного пользователя непосредственно к работе на оборудовании ЦКП устанавливается в договоре. Услуги коллективного пользования научным оборудованием могут предоставляться как на возмездной, так и на безвозмездной основе.

Проведение ЦКП научных исследований и оказание услуг на возмездной основе заинтересованным пользователям осуществляется на основе договора между организацией-заказчиком и ИФМ РАН. Используется Типовой договор на проведение научных исследований и оказание услуг. Перечень типовых услуг ЦКП, используемое оборудование и форма заявки представлены на сайте ЦКП в сети Интернет.

Услуги на проведение научных исследований, не входящие в Перечень типовых услуг, могут оказываться в форме договора на выполнение НИР. По завершению оказания

услуги внешнему пользователю выдается соответствующий документ, содержащий результаты выполненных работ, (отчет, протокол испытаний, измерений и др.).

Услуги на безвозмездной основе оказываются без оформления договора. Как правило, это небольшие по объему работы, оформление договора на которые признается нецелесообразным. Они выполняются в порядке оказания научно-технического содействия, либо в рамках выполнения совместных НИР, и часто служат рекламой возможностей ЦКП на начальном этапе работ с организацией-заказчиком. Документом, подтверждающим наличие заявки, обычно служит Письмо на бланке организации-заказчика на имя руководителя ЦКП с просьбой выполнить некоторые работы. Документом, подтверждающим факт выполнения услуги, служит «Акт о выполнении услуг ЦКП ИФМ РАН». К сожалению, в настоящее время большой объем работ, выполняемых ЦКП ИФМ РАН в рамках совместных НИР ИФМ РАН с другими научными организациями, остается неоформленным документально.

5.2 Описание исследований в интересах сторонних организаций, выполненных в ЦКП ИФМ РАН в 2011 году

В «Справке о числе организаций-пользователей научным оборудованием ЦКП», Приложение 18.6, приведен список организаций, для которых выполнялись исследования на оборудовании ЦКП ИФМ РАН за отчетный период. Как описано в предыдущем подразделе, эти работы различаются по типу оформления:

- 1) договора на возмездной основе,
- 2) услуги по письму на безвозмездной основе,
- 3) совместные работы, не оформленные документами на настоящее время.

В соответствии с требованиями «Методических указаний по оформлению отчетности о достижении заданных значений индикаторов и показателей», в отчетность по индикатору И5.2.3 включены только организации, работы с которыми относятся к типу 1 и 2, т.е. имеют документальное подтверждение.

Примерами работ типа 1 по оказанию услуг с использованием измерительного оборудования ЦКП ИФМ РАН служат хоздоговорные работы с ОАО «КБ Икар», с Центром фотохимии РАН, с ФГУП «ННИПИ Кварц», с ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова» и с Московским государственным институтом радиотехники, электроники и автоматики, МИРЭА. В работе для ОАО «КБ Икар» на тему "Исследование свойств тонкопленочных структур методами рентгенодифракционного анализа и оптической профилометрии" использованы рентгеновские дифрактометры и оптическая измерительная система Talysurf CCI 2000. Как и во многих других случаях, сотрудники

ЦКП не просто сообщают результаты анализа (здесь это наличие кристаллических фаз, эпитаксиальные ориентировки слоев, высоты ступеней рельефа, шероховатость поверхности), но и, используя свой опыт, проводят анализ и обобщение результатов. В связи с этим работа имеет характер НИР. Это оказывается особенно полезным для нынешнего уровня развития промышленных предприятий, где понимание материаловедческих проблем остается далеким от желаемого. Работы для Центра фотохимии РАН по теме «Комплексное исследование оптических и фотофизических свойств образцов оптических сенсорных материалов на основе полимерных и силикатных наночастиц с молекулярными отпечатками» выполняются по госконтракту на НИР и включают большой набор измерений. Сложность представляет взаимная увязка результатов такого рода комплексных исследований новых и необычных объектов. Здесь также необходим опыт сотрудников ЦКП, выходящий за рамки обычных типовых измерений. Договор с ФГУП «ННИПИ Кварц» даже по своему названию включает в себя выход на технологию современных приборов: «Исследование и разработка топологии, технологии изготовления криоэлектронной микросхемы и ее испытание». Исследования и испытания на оборудовании ЦКП ИФМ РАН составляют важную часть этой работы. Это же относится к договору с ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова» «Исследование матрицы детекторов системы радиовидения 3-мм диапазона длин волн» и к договору с МИРЭА «Исследование предельных возможностей методов магнитно-силовой микроскопии для визуализации информации на современных и перспективных магнитных носителях». Важно отметить, что только наличие в распоряжении ЦКП ИФМ РАН современного аналитического оборудования и высококвалифицированных кадров позволяет проводить такие сложные исследования.

Примером работ типа 2 (в порядке научно-технического содействия) служат работы, выполненные в последнее время для ОАО «АКБЭЛ», НИФТИ при ННГУ, ИПФ РАН и др. Это небольшие, но необходимые заказчику исследования, такие как определение ориентации среза кристаллической пластины, определение состава 1, 2-х образцов. Здесь документом, фиксирующим заявку, служит непосредственно письмо на бланке организации, где излагается описание работы, а выполнение работ подтверждается Актом, утвержденным руководителем ЦКП.

Работы типа 3 - это совместные госбюджетные работы ИФМ РАН с другими институтами, не оформленные отдельными документами на выполнение измерений. Они составляют в настоящее время основной объем, и ближайшей целью руководства ЦКП является создание эффективной процедуры их учета и оформления отчетности. Информация о таких работах также включена в Приложение 18.6 с целью более полного

показа спектра работ, хотя в отчетность по индикатору И5.2.3 они не вошли. Это экспериментальные работы, где выполняются измерения на оборудовании ЦКП ИФМ РАН, и их результаты публикуются от имени нескольких организаций. Примером таких работ служат исследования в рамках комплексных программ Российской академии наук, Президиума РАН, Отделения физических наук РАН.

5.3 Развитие системы услуг и работы по метрологическому обеспечению ЦКП ИФМ РАН

Таблица 5.1 Перечень основного научного оборудования ЦКП ИФМ РАН

№ п/п	Наименование единицы оборудования	Марка	Фирма-изготовитель	Страна	Год выпуска	Баланс. стоим., (тыс. руб.)
1	2	3	4	5	6	7
1	Дифрактометр рентгеновский	Philips X'Pert PRO MRD	Philips	Нидерланды	2002	4 500
2	Дифрактометр рентгеновский	PANalitical X'Pert PRO MRD	PANalitical	Нидерланды	2006	5 760
3	Дифрактометр общего назначения	ДРОН-4	ЛНПО «Буревестник»	Россия	1989, 1990	800
4	Аналитический электронный микроскоп	JEM 2000EXII JEOL	JEOL	Япония	1989	25 000
5	Комплект оборудования подготовки объектов для электронной микроскопии с установкой ионного травления	IEU 100 Balzers	Balzers	Швейцария	1988	4500
6	Стенд спектральных измерений на основе лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения	EMG-203, РСМ-1000	Lamda Physik, ЛНПО «Буревестник»	Германия Россия	1988	7500

7	Сканирующий зондовый микроскоп	"Solver-NV"	НТ-МДТ, Зеленоград	Россия	2006	25000
8	Комплект для СВЧ-измерений (Генератор сигнала, анализатор спектра, цифровой осциллограф)	E8257D, E4407B, TDS3000B	Agilent Technologies, Tektonix Inc	США	2004,2006	3700
9	Комплекс фурье-спектроскопии высокого разрешения на основе Фурье спектрометра	BOMEM DA3.36	BOMEM. (В настоящее время ABB)	Канада	1988г.в., модернизация в 2001 г	3600
10	Фурье-спектрометр	Vertex 80V	BRUKER OPTIC GmbH	Германия	2006	3800
11	Фурье-спектрометр	Инфралюм ФТ-801	НПФ «Люмэкс-Сибирь»,	Россия	2004	750
12	Сканирующий электронный микроскоп	Supra 50VP	Carl Zeiss	Германия	2005	17000
13	Двухлучевая система с высоким разрешением для исследования и подготовки образцов	Neon-40	Carl Zeiss	Германия	2009	50426
14	Измерительная система	Talysurf CCI 2000	Taylor & Hobson	Великобритания	2006	5149.5
15	Вторично-ионный масс-спектрометр	TOF-SIMS 5-100	ION-TOF	Германия	2008	54000
16	Установка реактивного ионного травления с источником индуктивно связанной плазмы	PlasmaLab 80	Oxford Instruments	Великобритания	2006	12140.4
17	Сверхпроводящая магнитная система	CryoMagnet 05-40-8	ООО «РТИ, Криомагнитные системы»	Россия	2009	2500

Таблица 5.2 Перечень услуг предоставляемых ЦКП ИФМ РАН по аналитическим измерениям

№ п/п	Наименование услуги	Используемое научное оборудование
1	2	3
1	Рентгеновский дифракционный анализ эпитаксиальных слоев	1-3
2	Анализ тонких слоев методом малоуглового рентгеновского рассеяния	1,2
3	Определение параметров многослойных зеркал с помощью рентгеновской рефлектометрии.	1,2
4	Определение отклонения среза подложек кремния, арсенида галлия и сапфира	3
5	Рентгеновский дифракционный анализ эпитаксиальных слоев $YBa_2Cu_3O_{7-d}$	3
6	Определение параметров многослойных зеркал в диапазоне мягкого рентгена	6
7	Прецизионное измерение коэффициентов отражения многослойных зеркал в диапазоне мягкого рентгена	6
8	Элементный анализ поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа	12,13
9	Морфометрический анализ поверхности с помощью растрового электронного микроскопа	12,13
10	Электронная литография с помощью сканирующего электронного микроскопа	12,13
11	Анализ поверхности с помощью сканирующей зондовой микроскопии	7
12	Анализ поверхности с помощью интерферометра белого света	14
13	Послойный элементный анализ методом вторично-ионной масс-спектрометрии.	15
14	Определение концентрации кислородсодержащих термодоноров в кремнии методом абсорбционной ИК спектроскопии.	9
15	Определение квантовой эффективности в кремниевых светоизлучающих структурах, легированных эрбием.	9
16	Определение электроактивных примесей в моноизотопном кремнии.	9

17	Исследование спектров пропускания, фотопроводимости, люминесценции и стимулированного излучения полупроводниковых структур, кристаллов и диэлектрических материалов методом Фурье-спектроскопии.	9,10,11
18	Измерение вольт-амперных характеристик сверхпроводящих мостиков и джозефсоновских переходов	8, 17
19	Измерение транспортных (осцилляции Шубникова – де Гааза) и оптических в терагерцовом диапазоне (фотопроводимость, циклотронный резонанс) характеристик полупроводниковых гетероструктур при низких температурах	17

Как уже отмечалось в п. 4.1.4, в рамках настоящего госконтракта приобретаются метрологически поверенные приборы с сертификатом средства измерения, аттестованные методики и контрольные образцы. Выполнена поставка профилометра и микроскопа с сертификатом о внесении в Госреестр СИ по степени точности 1-й степени со сроком действия до апреля 2016 года. Имеются свидетельства о поверке и набор аттестованных методик, перечисленных в п. 4.1.4.

Аттестованные образцы могут быть использованы при аттестации методик измерения на других, уже имеющихся измерительных приборах ЦКП ИФМ РАН, например, на оптической измерительной системе Talysurf CCI 2000, что обеспечит существенное продвижение ЦКП в его метрологическом обеспечении.

Кроме того, ЦКП ИФМ РАН начал совместные работы с Региональным отделением Центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции nanoиндустрии (ЦМО) в Приволжском федеральном округе. Эти работы предполагают создание новых методик и использование оборудования ЦКП ИФМ РАН для целей метрологического обеспечения нанотехнологий в ПФО.

5.4 Развитие измерительных методик в ЦКП ИФМ РАН

В ЦКП ИФМ РАН постоянно ведутся работы по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. Большая работа проведена по освоению возможностей закупленного ранее в рамках мероприятия 5.2 ФЦП прибора нового типа - времяпролетного (*time-of-flight*) масс-спектрометра вторичных ионов TOF.SIMS-5. К настоящему времени исследования не доведены до уровня, когда фирма-изготовитель могла бы включить методики анализа в состав математического обеспечения прибора. В настоящем подразделе представлены 2 разработки ЦКП ИФМ РАН: определение чувствительности и построение градуировочных линий для анализа концентрации матричных элементов в слоях твердого раствора Ge_xSi_{1-x} и количественный безэталоный

анализ методом ВИМС содержания изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в образцах кремния в широком диапазоне вариации изотопа ^{28}Si .

5.4.1 Анализ чувствительности масс-спектрометра TOF.SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов

Задачей работы было определение чувствительности и построение градуировочных линий для используемого в ЦКП ИФМ РАН прибора нового типа - времяпролетного (*time-of-flight*) масс-спектрометра TOF.SIMS-5 при анализе концентрации матричных элементов в слоях твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Известно [60], что чувствительность ВИМС к примесным атомам достаточно легко определяется по калибровочному образцу, поскольку в области малых концентраций при неизменной матрице сохраняется линейная зависимость интенсивности регистрируемых ионов от концентрации атомов в матрице. Однако чувствительность к атомам, концентрация которых составляет единицы и десятки процентов (матричные элементы), существенно нелинейна и зависит от самой этой концентрации. Теоретические расчеты здесь отстают от эксперимента, см., например, [61], поэтому одновременно продолжается развитие теории и экспериментальных приемов калибровки, необходимых для надежного анализа полупроводниковых гетероструктур. Подобные работы проводятся во многих группах, использующих приборы этого типа, по причине того, что к настоящему времени результаты не доведены до уровня, когда фирма-изготовитель могла бы включить процедуру калибровки в состав математического обеспечения прибора. Исследованные в настоящей работе слои $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ это один из простейших и хорошо изученных типов структур, что позволяет сравнить полученные результаты с результатами других групп. В работе [62] было, в частности, показано, что выход ионов $^{70}\text{Ge}^-$ и $^{70}\text{Ge}^+$ из слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ не является монотонной функцией состава (x). Одной и той же интенсивности могут соответствовать разные x , что говорит о сильных матричных эффектах. Более информативным оказался анализ по выходу комплексных ионов ($^{74}\text{Ge}^-$, $^{76}\text{Ge}^-$) [62], Ge_2^- , Ge_3^- , Ge_4^- [63]. Наиболее полезными показали себя комплексные ионы GeCs^+ , GeCs_2^+ , в общем случае, M_nCs_k^+ [64-66], где M - анализируемый элемент, а цезий появился из распыляющего пучка Cs^+ . В работе [66] для прибора TOF-SIMS V при распылении ионами Cs^+ , 2 кэВ, анализирующий пучок Bi_3^+ , 25 кэВ, угол наклона обеих пушек 45° к поверхности образца, были найдены коэффициенты для линейных зависимостей $W=kX$, где $W=(\text{GeCs}_k^+/\text{SiCs}_k^+)$ определено из профилей ВИМС тестовых образцов, а $X=[x/(1-x)]$ - из независимых рентгеновских измерений. Получены значения $k=0.443$ (MCs_2^+) и $k=0.341$ (MCs^+), однако, при сравнении с аналогичными результатами

для магнитно-секторного ВИМС Cameca 5F оказалось, что параметр линейной регрессии R для TOF-SIMS V несколько хуже, $R(\text{MCs}_2^+) = 0.9974$ против 0.9999. Приведенные в [66] данные недостаточны для определения природы отклонений. Остается много вопросов, связанных с зависимостью калибровочных коэффициентов от условий эксперимента, а также более общие вопросы, например, о достаточности линейной регрессии и о том, что считать критерием преодоления матричных эффектов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Были выращены тестовые структуры толстых слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с набором составов x от 5 до 40%. На приборе TOF.SIMS-5 выполнен послойный ВИМС-анализ и определен выход разнообразных ионов и кластеров в зависимости от состава слоя в стационарном режиме, когда интенсивность выходит на стационарное значение вдали от поверхности и переходных областей. Интенсивность измерялась интегрированием спектра масс в окрестности пика в интервале около 0.01 а.е.м., что обеспечивало включение не менее 99% интегральной интенсивности пика. Использован распыляющий пучок Cs^+ , 2 кэВ, наклон 45° . Анализирующий пучок - Bi_3^+ , 25 кэВ, наклон 45° . Состав слоев независимо измерен методом рентгеновской дифрактометрии (РД) локально в области образца рядом с кратером ВИМС, в расчете учтены остаточные упругие деформации.

На рис. 5.1 показаны интенсивности выхода некоторых ионов в зависимости от состава слоя. Видна существенная нелинейность зависимостей (менее других для Cs_2Ge^+), что говорит о сильном влиянии матричных эффектов. Линейность улучшается, рис. 5.2, при использовании " $x/(1-x)$ "- нормировки, когда берется относительная интенсивность выхода ионов в зависимости от $x(\text{Ge})/x(\text{Si})$. Более наглядно на уровне доли процента качество калибровки демонстрирует рис. 5.3, где видно отклонение "предсказываемых" по градуировочной прямой ВИМС значений $x(\text{Ge})$ от измеренных РД-методом. Использована следующая процедура. Точки рис. 5.1 и 5.2 (без нормировки на 1) аппроксимированы прямыми линиями, которые служат градуировочными линиями при использовании соответствующих ионов, $\Delta x = x(\text{выч.}) - x(\text{эксп.})$, где $x(\text{выч.})$ определено по градуировочной прямой, а $x(\text{эксп.})$ - рентгеновское $x(\text{Ge})$. Получены коэффициенты наклона $k = 0,83$ для $(\text{Cs}_2\text{Ge}^+ / \text{Cs}_2\text{Si}^+)$ и $k = 0,68$ для $(\text{CsGe}^+ / \text{CsSi}^+)$.

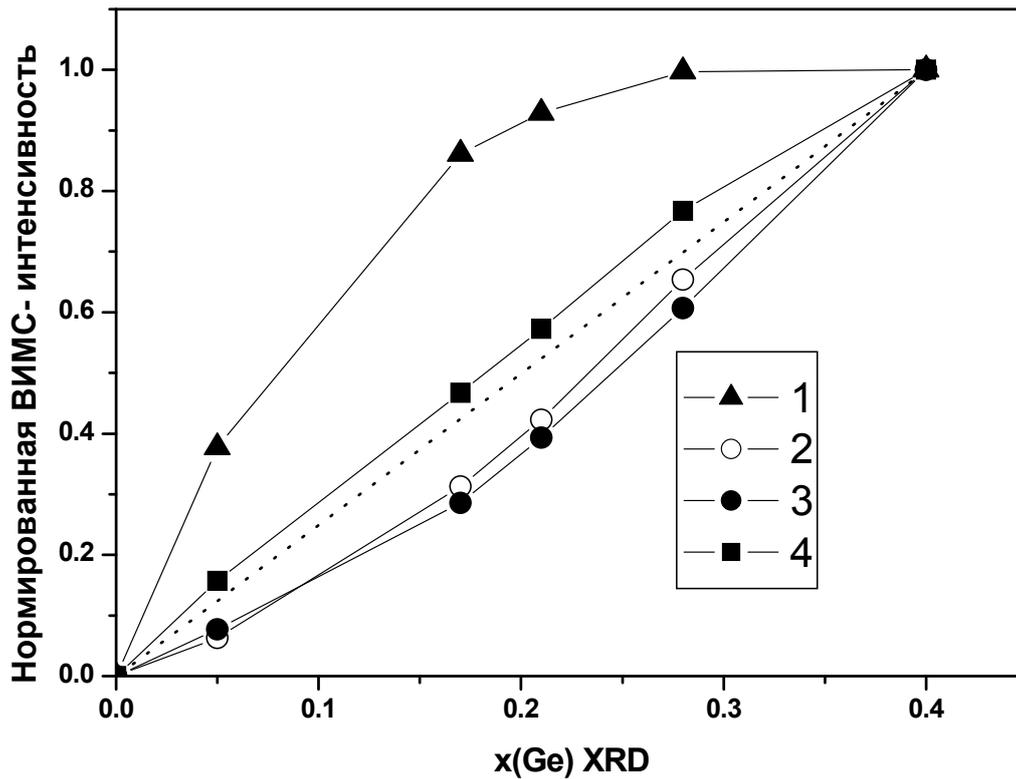


Рисунок 5.1. Интенсивность выхода некоторых ионов в зависимости от состава слоя: 1 - $^{74}\text{Ge}^-$; 2- $^{74}\text{Ge}_2^-$; 3- $^{133}\text{Cs}^{74}\text{Ge}^+$; 4- $^{133}\text{Cs}_2^{74}\text{Ge}^+$. Интенсивности нормированы максимальным значением на 1.

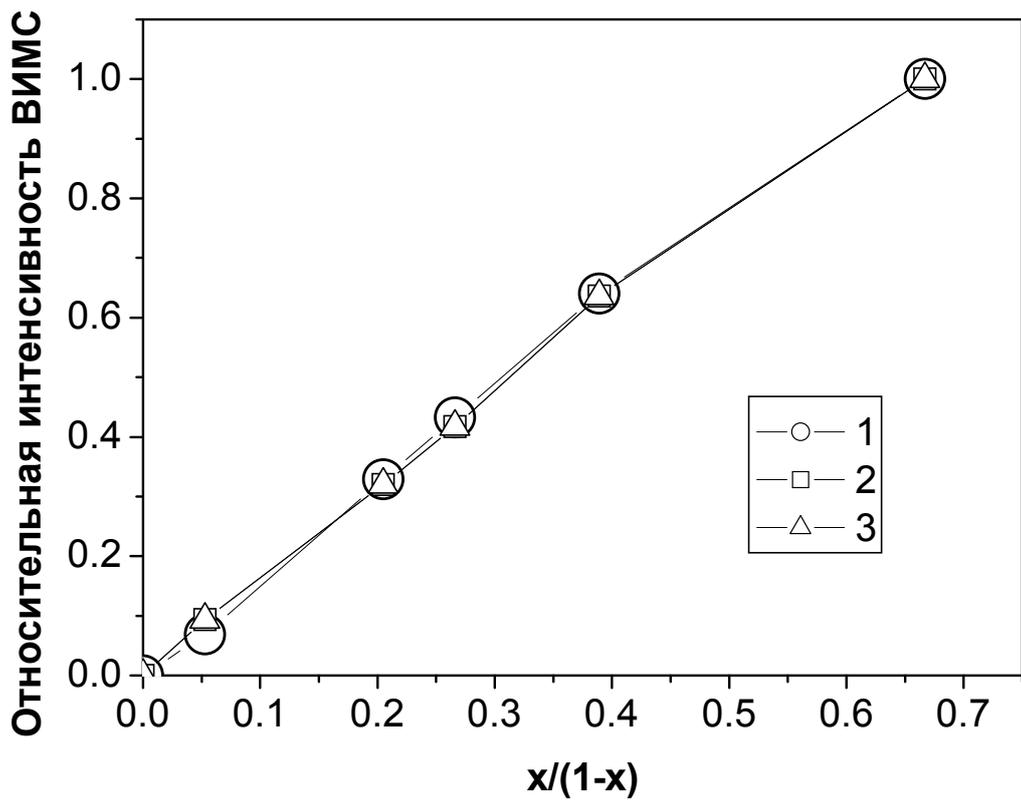


Рисунок 5.2. Относительная интенсивность выхода некоторых ионов в зависимости от $x(Ge)/x(Si)$: 1 - $^{74}Ge^{-}/^{28}Si^{-}$; 2- $^{133}Cs^{74}Ge^{+}/^{133}Cs^{28}Si^{+}$; 3- $^{133}Cs_2^{74}Ge^{+}/^{133}Cs_2^{28}Si^{+}$. Интенсивности нормированы максимальным значением на 1.

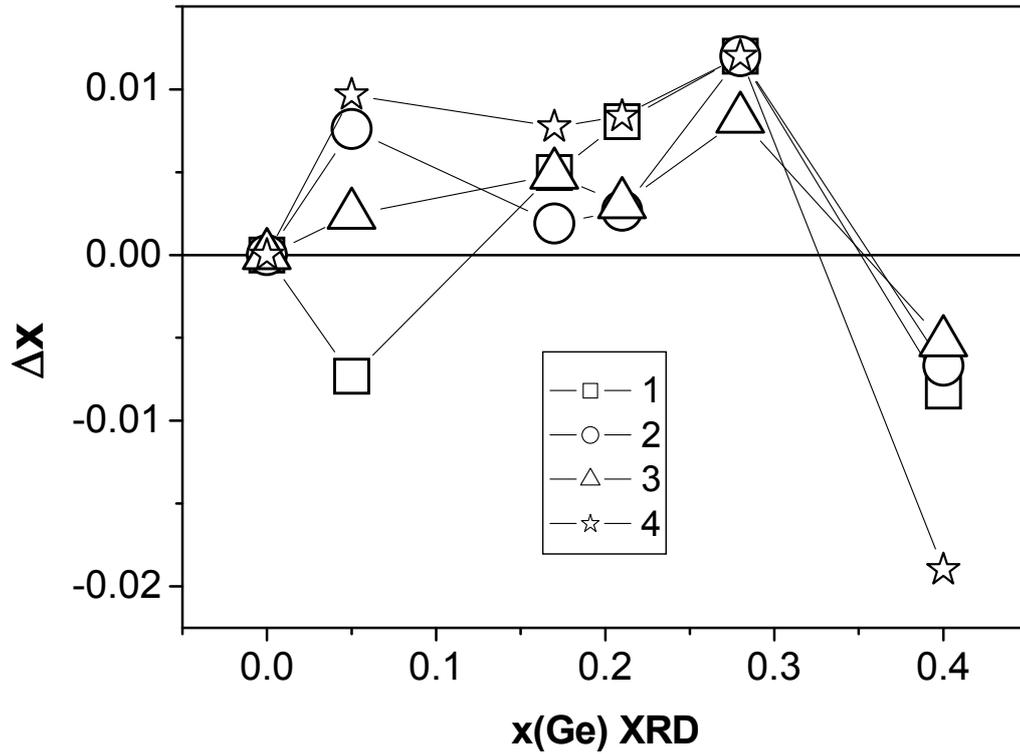


Рисунок 5.3. Отклонение ВИМС- значений $x(\text{Ge})$ от измеренных РД-методом. Значения определены по градуировочным прямым линиям: 1 - $^{74}\text{Ge}^{-}/^{28}\text{Si}^{-}$; 2- $^{133}\text{Cs}^{74}\text{Ge}^{+}/^{133}\text{Cs}^{28}\text{Si}^{+}$; 3- $^{133}\text{Cs}_2^{74}\text{Ge}^{+}/^{133}\text{Cs}_2^{28}\text{Si}^{+}$; 4- $^{133}\text{Cs}_2^{74}\text{Ge}^{+}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 5.2 и 5.3 показывают, что точность определения состава слоев по данным ВИМС достигает 1% при использовании отношения Cs_2Ge^+/Cs_2Si^+ и калибровочной прямой линии. Отличие (\sim в 2 раза) значений k от данных работы [66] связано с неговоренным авторами [66] использованием изотопа ^{70}Ge в отличие от ^{74}Ge , использованного нами. В смеси изотопов в природном германии отношение $^{74}Ge/^{70}Ge \approx 1.8$, что и объясняет расхождение. Такое объяснение подтверждается тем, что наши данные по $Cs_n^{70}Ge^+$ близки к [66]. Использование ^{74}Ge имеет то преимущество, что повышает чувствительность анализа примерно в 2 раза.

В нашей работе, как и в [66], использована аппроксимирующая линия $W=kX$. Аппроксимация линией $W=kX+c$, не проходящей через т.(0,0), как это сделано, например, в [67], по нашему мнению, не оправдана. Даже небольшая величина $c \sim 10^{-3}$ существенно исказит результаты в области малых $x \sim 10^{-6}$, где ВИМС уверенно чувствует примесь. По той же причине квадратичная аппроксимация должна включать точку (0,0), т.е. иметь вид $W = aX^2 + bX$. Достаточность линейной аппроксимации, вероятно, связана с ограниченной точностью измерений для точек градуировочной линии, т.к. теоретических предпосылок появления линейной зависимости не существует. Более того, результат зависит от многих параметров эксперимента, например, энергии распыляющего пучка Cs^+ [67]. Если отклонения Δx (рис.5.3) не превышают погрешности измерения тестовых образцов, либо не ставится задача определить x из ВИМС точнее, чем Δx , то линейная аппроксимация достаточна. В противном случае легко перейти к квадратичному приближению, тем более что это не вносит заметных усложнений в алгоритм обработки профилей ВИМС, когда уже использована нелинейная $x/(1-x)$ - калибровка.

Природу линейаризации зависимости выхода комплексных ионов от состава образца строго объяснить в настоящее время невозможно, поскольку отсутствует описание процессов выхода комплексных ионов. Важную роль играет, по-видимому, слабая зависимость выхода ионов Cs^+ и Cs_2^+ от состава Ge_xSi_{1-x} . На профилях ВИМС наших образцов это проявлялось в том, что при переходе из области слоя $Ge_{0.4}Si_{0.6}$ в область подложки (Si) изменение интенсивности выхода было небольшим: Cs^+ (-4.8%); Cs_2^+ (+5.6%), но уже для Cs_3^+ -52%.

Если считать [65-67], что комплексный ион $GeCs^+$ образуется за счет ассоциации нейтрального атома Ge и иона Cs^+ , то наблюдаемая линейаризация выхода $GeCs^+$ в сравнении с Ge^- свидетельствует о том, что выход нейтральных атомов Ge пропорционален $x(Ge)$, т.е. не искажен матричными эффектами, в отличие от Ge^- или Ge^+ .

Отсюда следует, что матричные эффекты проявляются на этапе ионизации вышедшего атома Ge.

Сравнение рис. 5.1 и 5.2 показывает, что использование относительных интенсивностей и $x/(1-x)$ - калибровки улучшает линейность калибровочных линий. Кроме очевидной нормировки, корректирующей вариацию условий эксперимента, происходит, видимо, учет различия поверхностной и объемной концентрации Ge. При достижении стационарного режима во время послойного травления суммарный выход атомов $Y(\Sigma Ge)$ и $Y(\Sigma Si)$ должен соответствовать соотношению атомов в образце:

$$Y(\Sigma Ge)/Y(\Sigma Si) = x(Ge)/x(Si). \quad (1)$$

Даже в случае, когда вероятности выбивания атомов Ge и Si различаются между собой, соотношение (1) выполняется за счет изменения поверхностной концентрации атомов - накопления тех, которые слабее распыляются. Фактически, анализируется область с измененным составом, но за счет (1) результат не искажен этим эффектом. Рассуждение строго применимо к однопучковым ВИМС, где и травление, и анализ ведутся одним пучком ионов, например, Ar^+ . Менее очевидно это в случае дуального ВИМС типа TOF SIMS, где измененный состав формируется одним пучком, травящим, а анализ идет при использовании второго пучка. Тем не менее, сравнительный эксперимент, выполненный в работе [66], показывает близкие результаты для двух типов ВИМС. Возможно, что наблюдаемое в [66] снижение линейности в TOF SIMS связано с эффектом неэквивалентности двух пучков.

Приведенные простейшие соображения не объясняют многие другие наблюдаемые в эксперименте закономерности, поэтому для определения их реальной значимости необходимы дополнительные исследования.

Строго говоря, использование $x/(1-x)$ - калибровки нельзя назвать "преодолением" матричных эффектов. Скорее, это удобный способ учета нелинейности выхода ионов. Наглядное свидетельство этому дает сравнение почти прямой линии Ge^-/Si^- на рис. 5.2 и явно нелинейной зависимости Ge^- от $x(Ge)$ на рис. 5.1. При использовании отношений происходит частичная компенсация нелинейностей двух зависимостей, с другой стороны, это может затруднять интерпретацию профилей переходных областей, поскольку глубины выхода различных ионов могут различаться, как и накопление ионов на поверхности. Тогда числитель и знаменатель будут относиться к различным глубинам приповерхностного слоя. В этом смысле, близкие к линейным зависимости от $x(Ge)$ для Cs_2Ge^+ и, хотя и несколько хуже, для Ge_2^- , говорят о возможности преодолеть матричные

эффекты, однако, точность количественного анализа при этом ниже, чем при использовании относительных интенсивностей.

Таким образом, показано, что:

- Использование комплексных ионов Ge_2^- , Cs_2Ge^+ позволяет в значительной степени преодолеть влияние матричных эффектов при ВИМС- анализе слоев GeSi .
- Наиболее точные значения концентрации твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ получаются при ВИМС- анализе отношения интенсивностей $\text{CsGe}^+ / \text{CsSi}^+$ в зависимости от $x/(1-x)$.
- Коэффициенты наклона калибровочной прямой зависят от условий эксперимента и выбора изотопов, в частности, чувствительность метода повышается \sim в 2 раза при использовании изотопа ^{74}Ge вместо ^{70}Ge .

5.4.2 Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5

В последнее время наблюдается интерес к изготовлению образцов Si, обогащенных изотопом ^{28}Si . Наиболее известным является международный проект “Avogadro” по изготовлению нового эталона массы, кроме того, проводятся исследования особенностей электронного транспорта в структурах на основе ^{28}Si , связанных с изменением характера фононного спектра и спектра примесных состояний. Как правило, для анализа изотопного состава образцов Si используются методы масс-спектрометрии [68], требующие достаточно большого количества материала, начиная от нескольких мг. При этом чаще всего также необходимо наличие эталонных структур Si с калиброванным содержанием изотопов. Альтернативу этим методам измерений может составить использование вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). В данной работе обсуждается возможность количественного безэталонного анализа содержания изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в образцах кремния в широком диапазоне вариации изотопа ^{28}Si методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5.

Необходимым условием анализа является высокое массовое разрешение, позволяющее разделять линии ^{29}Si и ^{28}SiH в масс-спектрах, которые отличаются на 0.006 а.е.м. Водород всегда является одной из основных примесей в Si и образует сильные линии кластеров SiH при регистрации как положительных, так и отрицательных ионов. Для достаточно чистых образцов Si с содержанием изотопов, близким к природному, линия ^{29}Si как правило превосходит ^{28}SiH , поэтому анализ таких образцов не представляет серьезных проблем. Однако в образцах обогащенных изотопом ^{28}Si выше 99.8% спектрометры с низким массовым разрешением дают заниженное значение концентрации

^{28}Si из-за перекрытия линий ^{29}Si и ^{28}SiH . В установке TOF.SIMS-5 с время-пролетным масс-анализатором реализовано высокое массовое разрешение, превышающее 10000, что позволяет разделить линии ^{29}Si и ^{28}SiH в масс-спектрах. Это демонстрируется рис.5.4, на котором приведен масс-спектр образца моноизотопного Si (предоставленного фирмой VITCON) с концентрацией ^{28}Si , превышающей 99.98%, полученный на установке TOF.SIMS-5. Рис.5.4 приведен для узкого диапазона масс от 28.94 до 29.06 а.е.м., он показывает, что в области 29 а.е.м. присутствуют две линии – ^{29}Si и значительно более сильная линия ^{28}SiH , которые практически полностью разделены в спектре. Отметим, что перекрытие линий $^{28}\text{SiH}_2$ и ^{29}SiH с линией ^{30}Si играет меньшую роль при определении концентрации ^{28}Si .

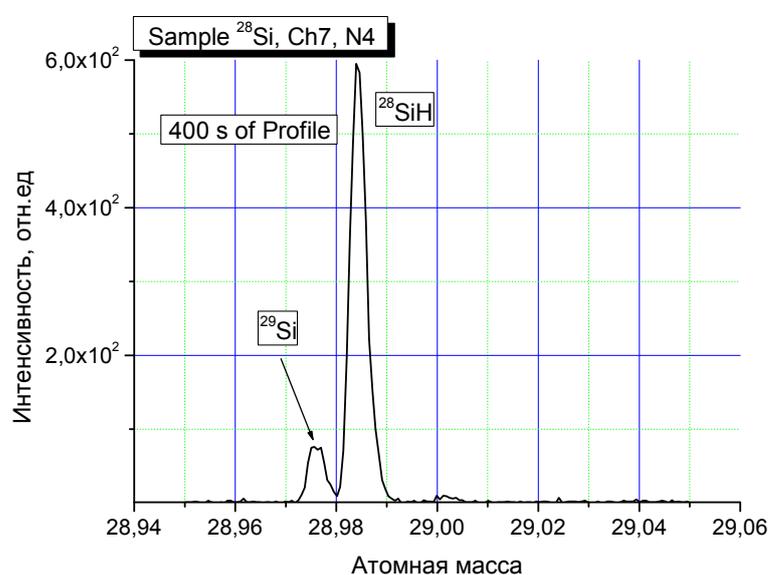


Рисунок 5.4 Масс-спектр образца #1 в области 29 а.е.м.

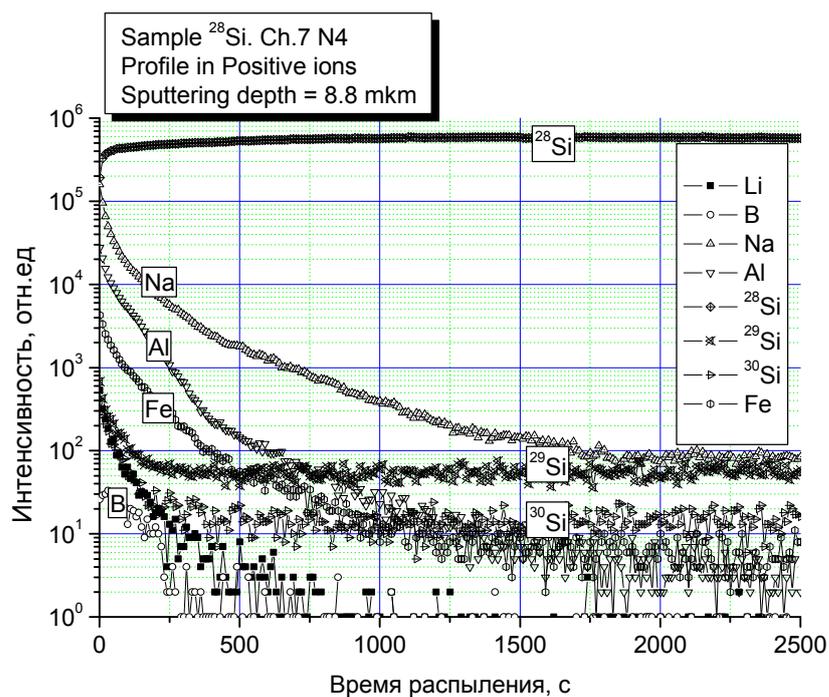


Рисунок 5.5 Распределение элементов в образце #1.

Вторым важным условием для анализа структур Si является отсутствие насыщения детектора ионов при регистрации сильной линии ^{28}Si , что обеспечивает линейность связи регистрируемой интенсивности с концентрацией этого элемента. Конечно, это условие является не столь принципиальным, как первое. Даже при насыщении детектора и нелинейной связи интенсивности линии ^{28}Si с концентрацией количественный анализ возможен с использованием эталонных структур путем регистрации более слабых кластерных линий $^{28}\text{Si}_2$. В то же время, возможность безэталонного анализа представляет значительное удобство и простоту. Кроме того, для анализа высокообогащенных образцов ^{28}Si необходимы эталоны, калиброванные с высокой точностью, что представляет отдельную задачу. Насыщение выходного сигнала детектора в режиме счета одиночных ионов связано с «мертвым временем» детектора. На установке TOF.SIMS-5 проблему насыщения детектора ионов при анализе сильной линии ^{28}Si удастся решить путем использования пуассоновской коррекции мертвого времени детектора, предложенной в работе [69]. Это оказывается возможным в установках ВИМС время-пролетного типа вследствие очень малого числа ионов Vi^+ в зондирующем пучке - длительность импульса составляет 0.5 – 1 нс, а величина тока 1 пА. При этом в зондирующем импульсе содержится не более 500 ионов Vi^+ . Алгоритм коррекции основан на предположении о пуассоновском распределении анализируемых ионов данного типа по времени попадания

на детектор. Это позволяет использовать простую аналитическую связь между средними значениями числа ионов, достигающих детектора и реально детектируемых. Алгоритм был разработан для изотопов нескольких элементов, включая Si. Была показана линейность связи скорректированной интенсивности линии ^{28}Si с числом зондирующих импульсов и отсутствие систематической погрешности в определении концентрации изотопов в природном кремнии [69,70]. Здесь используется также то обстоятельство, что коэффициент пропускания масс-анализатора для ионов $^{28-30}\text{Si}$ с близкими массами различается незначительно. Для дополнительной проверки мы провели анализ кремния, легированного различными элементами (B, P, Sb). Для определения интегральной интенсивности линий $^{28-30}\text{Si}$ проводилось суммирование от 10^3 до 10^7 импульсов. Мы получили, что концентрация ^{28}Si = 91,9% - 92,6%, что хорошо соответствует приводимым в литературе данным для природного кремния.

В работе проведено исследование изотопного состава образцов Si, предоставленных фирмой VITCON, обогащенных изотопом ^{28}Si в диапазоне 99.75% - 99.995%, а также пленок аморфного Si, обедненных изотопом ^{28}Si (осажденных на стандартных подложках Si). Более подробно приведены результаты анализа образца Ch.7 N4 (ниже #1). Исходной информацией для определения концентрации изотопов служили профили элементов в положительных (распыление ионами O_2^+) – рис.5.5 и отрицательных (распыление Cs^+) регистрируемых ионах. Калибровка глубины анализа проводилась путем измерения глубины кратера распыления на оптическом интерференционном профилометре Talysurf CCI-2000. На рис.5.6 приведен профиль концентрации изотопа ^{28}Si в структуре #1. Как видим, вплоть до глубины 1.5 мкм концентрация ^{28}Si значительно ниже объемной. Стационарное значение концентрации ^{28}Si достигается только на большей глубине. Такие измерения были проведены в нескольких точках образца при распылении O_2^+ и Cs^+ , что позволило сделать следующие выводы о точности определения концентрации ^{28}Si в образце #1:

- наибольшую погрешность вносит неоднородность образца по глубине и по площади, в восьми точках анализа получено значение ^{28}Si = 99.986% - 99.989%;
- влияние перекрытия линий ^{29}Si и ^{28}SiH незначительно;
- нестабильность тока пучка ионов Vi^+ незначительна, т.к. полный масс-спектр снимается после каждого импульса.

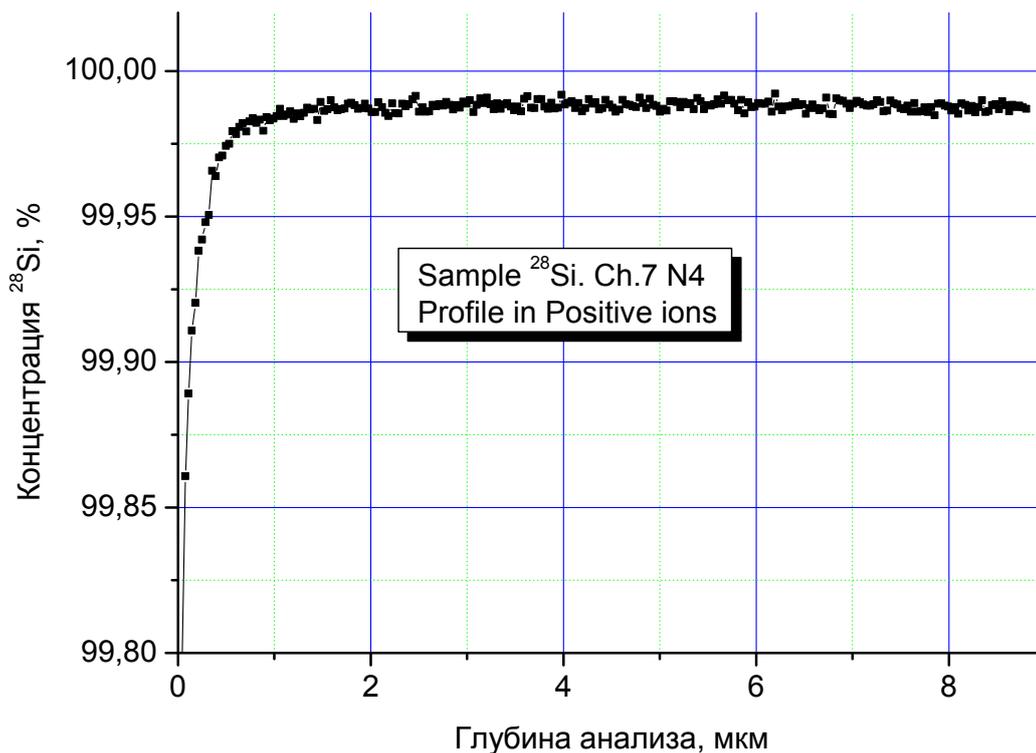


Рисунок 5.6 Профиль концентрации ^{28}Si в образце #1

В исследованном образце #2 степень обогащения изотопом ^{28}Si была на порядок выше, чем в #1, $^{28}\text{Si}=99.995\% \pm 0.001\%$. В образце #2 было обнаружено значительное изменение соотношения изотопов $^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ до 25 от 1.51 для природного содержания и 3.7 – для образца #1. Это отражает степень очистки исходной газовой смеси при разделении изотопов – наиболее трудно очистить газовую смесь от более близкого к ^{28}Si изотопа ^{29}Si .

Рис.5.7 демонстрирует распределение концентрации изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в пленках аморфного кремния, выращенных на стандартных подложках Si методом плазмохимического осаждения. Ранее мы уже сообщали о возможности получения этим методом слоев кремния в газовой системе «тетрафторид кремния – водород» [71]. В настоящей работе использовалась газовая смесь тетрафторида кремния, обедненного изотопом ^{28}Si , с водородом. Данные рис.5.7 о концентрации ^{28}Si в пленке находятся в хорошем соответствии с данными о концентрации изотопов в исходном SiF_4 . Заметим, что сверхрешетки на основе изотопов кремния могут служить очень интересным тестовым объектом для развития методики ВИМС с высоким разрешением по глубине [72].

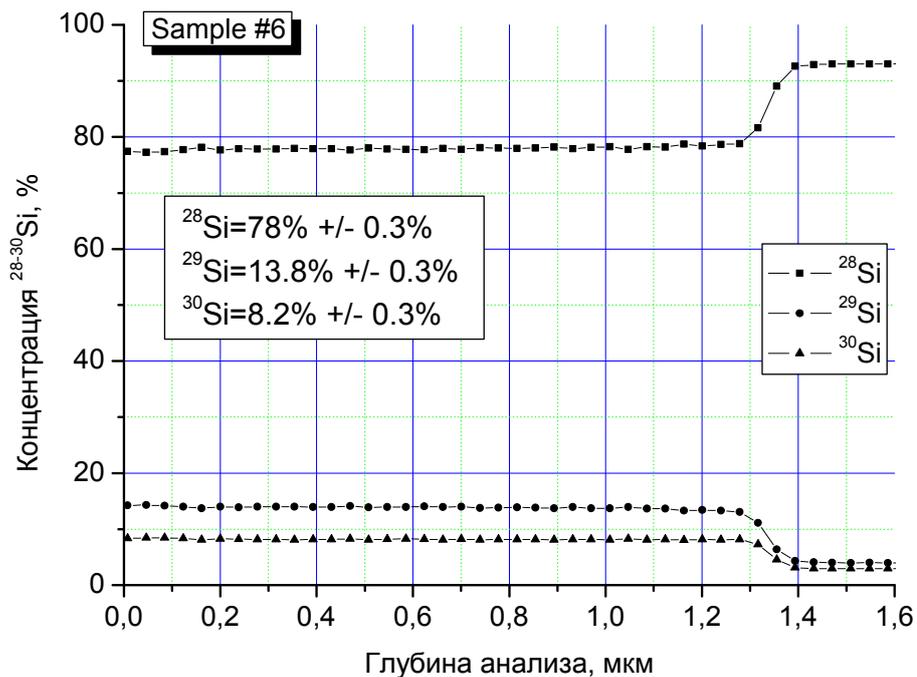


Рисунок 5.7 Распределение концентрации изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в образце аморфного кремния

Таким образом, в работе показана возможность количественного безэталонного анализа содержания изотопов $^{28-30}\text{Si}$ в образцах кремния методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5 в широком диапазоне вариации изотопа ^{28}Si . Мы установили, что для образцов с высокой степенью обогащения изотопом ^{28}Si неоднородность образца по глубине и по площади приводит к наибольшей погрешности и определяет необходимый объем материала для анализа. Эту особенность распределения изотопа ^{28}Si в поверхностных слоях необходимо иметь в виду при определении концентрации ^{28}Si другими методами, использующими большее количество материала и дающими усредненные данные.

6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИТОГРАФИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА (внебюджетное финансирование)

Из общефизических представлений очевидно, что дальнейшее продвижение в сторону повышения рабочих частот электронных устройств требует уменьшения размеров рабочих элементов схем, а значит, литографические схемы должны сдвигаться в сторону использования более коротких длин волн, экстремального ультрафиолета, мягкого рентгена. В настоящее время в ИФМ РАН ведутся работы по созданию станда нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм, который предназначен для формирования рисунка на фоторезисте с минимальным размером элемента до 30 нм [73]. Ключевым элементом нанолитографа, определяющим пространственное разрешение, является проекционный объектив. Для достижения дифракционного предела разрешения изображающей схемы, в соответствии с критерием Релея, корень квадратный из среднеквадратической деформации ее волнового фронта не должен превышать $\lambda/14$ (критерий Марешаля), где λ – рабочая длина волны. В нашем случае, для 2-х зеркального проекционного объектива с рабочей длиной волны 13,5 нм деформация волнового фронта не должна превышать $\text{rms}_{\text{об}}=0,96$ нм (root-mean-square). Следовательно, требования на деформации формы поверхности отдельного зеркала ужесточаются и составляют $\text{rms}_1 = \text{rms}_{\text{об}}/\sqrt{2} = 0,71$ нм.

Традиционная оптическая промышленность обеспечивает почти на два порядка худшую точность изготовления оптики. На мировом рынке соответствующая продукция так же отсутствует и, фактически, только фирма Цайс, Германия, производит подобную оптику в ограниченных объемах для проектов по литографии экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона [74]. Поэтому, для создания проекционного объектива для отечественного ЭУФ нанолитографа в ИФМ РАН был проведен комплекс исследований и разработан ряд методик и технологий в областях метрологии и изготовления (коррекции) оптических элементов, в том числе и асферической формы, с субнанометровой точностью.

6.1 Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии

6.1.1 Требования к качеству подложек для многослойной рентгеновской оптики

По мере развития многослойной рентгеновской оптики возрастают требования к качеству изготовления и аттестации как самих многослойных зеркал, так и подложек, на которые наносятся многослойные структуры. Так, для многослойных элементов изображающей оптики (сферических и асферических), применяемых в схемах EUV-литографии на длине волны $\lambda=13,5$ нм и рентгеновской микроскопии в спектральной области «водного окна» ($\lambda=2,3-5$ нм), отклонение формы поверхности исходной подложки от заданной в области пространственных частот $10^{-3}-10^{-6}$ мкм⁻¹ должны быть не больше 0,2-0,3 нм. Такому же условию должны удовлетворять и неровности поверхности во всем спектре пространственных частот от 10^{-3} до 10^3 мкм⁻¹ [75]. И изготовление, и диагностика поверхности зеркал и подложек с такой точностью представляет собой значительную сложность.

Низкочастотные отклонения формы поверхности LSFR (low spatial frequency roughness, $10^{-6} - 10^{-3}$ мкм⁻¹), искажающие изображение как целое, могут быть изучены с помощью разработанного в ИФМ РАН интерферометра с дифракционной волной сравнения [76]. Средние пространственные частоты в спектре отклонений формы поверхности – MSFR (middle spatial frequency roughness, $10^{-3} - 1$ мкм⁻¹) - приводят к рассеянию излучения на малые углы таким образом, что излучение остается в области изображения, но уменьшается его контраст. MSFR могут быть изучены с помощью оптического интерференционного микроскопа (ОИМ) [77] (в наших экспериментах использовался прибор типа Talysurf CCI 2000 ЦКП ИФМ РАН), а также методами диффузного рассеяния рентгеновского излучения [78] или атомно-силовой микроскопии (АСМ) [79]. Методами АСМ изучаются также высокочастотные дефекты поверхности (шероховатости) – HSFR (high spatial frequency roughness) с пространственными частотами от 1 до 10^3 мкм⁻¹, на которых падающее излучение рассеивается на большие углы. Это приводит к уменьшению коэффициента отражения зеркал и, как следствие, к уменьшению коэффициента пропускания оптической системы в целом, что также снижает контраст изображения. Для характеристики поверхностей подложек и многослойных зеркал широко используется отражение рентгеновского излучения с различными длинами волн [80-82].

В настоящей работе критически рассматриваются возможности выше перечисленных методов в части адекватного измерения неровностей супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики. В частности, показано, что зачастую наблюдаемое расхождение значений шероховатости поверхности, получаемых методами зеркального отражения рентгеновского излучения с одной стороны, и диффузного рентгеновского рассеяния и АСМ измерения - с другой [83], что объясняется разными областями интегрирования по спектру пространственных частот.

6.1.2 Методика эксперимента

Все использованные в работе методы характеристики поверхностей являются традиционными и достаточно подробно описаны в литературе, поэтому лишь кратко остановимся на основных соотношениях, применяемых для обработки результатов эксперимента.

Интерференционный и атомно-силовой микроскопы позволяют получить двумерную карту поверхности образца, по которой могут быть восстановлены ее основные статистические характеристики, такие как среднеквадратичная высота неровностей $\sigma_{АСМ}$ ($\sigma_{ОИМ}$), PSD (power spectral density) – функция, корреляционная функция и пр. Так, если $z(\vec{\rho})$ – высота поверхности в точке, определяемой радиус-вектором $\vec{\rho}$,

$$\sigma_{АСМ,ОИМ}^{N \times N} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (z(\vec{\rho}) - \langle z \rangle)^2}, \quad (2)$$

где $N \times N$ – число точек изображения. Было показано [85], что определяемая таким образом величина существенно зависит от размера кадра, а следовательно, не может являться универсальной характеристикой поверхности.

Применив к $z(\vec{\rho})$ Фурье-преобразование \hat{F} , можно восстановить двумерную PSD-функцию пространственной частоты $\vec{\nu}$ [85]

$$PSD_{2D}(\vec{\nu}) = \left| \hat{F}[z(\vec{\rho})] \right|^2, \quad (3)$$

связанную с функцией корреляции $C(\vec{\rho}) = \langle z(\vec{\rho})z(0) \rangle$ соотношением $C(\vec{\rho}) = \hat{F}^{-1}[PSD_{2D}(\vec{\nu})]$.

Спектр частот, в котором может быть определена PSD-функция поверхности, математически определяется размером кадра $L \times L$ и количеством точек изображения $N \times N$: $\nu \in [1/L, N/2L]$. При этом, однако, очевидное ограничение латерального разрешения АСМ связано также с формой острия зонда. В данной работе применялся микроскоп NT-

MDT Solver P47-PRO ЦКП ИФМ РАН и аттестованные зонды, представляющие собой (приближенно) конус с раствором 30° и с радиусом закругления на конце 20-30 нм. Таким образом, максимальная измеряемая пространственная частота $\sim 30 \text{ мкм}^{-1}$, что необходимо учитывать при восстановлении PSD-функции по экспериментальным данным.

Для Talysurf CCI 2000 исследования эталонного образца, представляющего собой последовательность «ступенек» высотой 50 нм и переменной шириной от 20 мкм до 2 мкм, продемонстрировали предельное латеральное разрешение 2 мкм, что соответствует максимальной пространственной частоте $\sim 0,5 \text{ мкм}^{-1}$.

В случае изотропных поверхностей соответствующим усреднением несложно перейти от двумерной PSD-функции к одномерной, в дальнейшем под PSD-функцией будем иметь в виду именно ее. Отметим также, что современное программное обеспечение, поставляемое фирмами-изготовителями совместно с микроскопами, позволяет производить первичную обработку карты высот, учитывая сдвиг и наклон образца к плоскости сканирования.

Одномерная PSD-функция также может быть получена из диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения. Геометрия задачи приведена на рис. 6.1. На поверхность под углом θ_0 падает излучение с длиной волны $\lambda \sim 0,1 \text{ нм}$. Для регистрации диаграммы рассеяния $\Phi(\theta, \varphi)$ используется детектор с характерными размерами h_θ по вертикали и h_φ по горизонтали (определяются соответствующими щелями), расположенный на расстоянии l от образца. Если a - корреляционная длина, угловые размеры диаграммы рассеяния определяются как $\delta\theta \sim \lambda/\pi a \sin\theta_0$ и $\delta\varphi \sim \lambda/\pi a$. Соответственно, при $\lambda \sim 0,1 \text{ нм}$ и углах, близких к критическому $\theta_c \ll 1$, диаграмма рассеяния оказывается вытянута вдоль направления θ : $\delta\varphi \ll \delta\theta$. Это позволяет перейти

от двумерной функции $\Phi(\theta, \varphi)$ к ее одномерному аналогу $\Pi(\theta) = \int_0^{2\pi} \Phi(\theta, \varphi) d\varphi$. В случае изотропных поверхностей в приближении малых шероховатостей $\Pi(\theta)$ связано с одномерной PSD-функцией поверхности через известные оптические параметры материала поверхности [86]:

$$\Pi(\theta) = \frac{|\pi(1-\varepsilon)t(\theta_0)t(\theta)|^2}{2\lambda^3 \sin\theta_0 \sqrt{\cos\theta_0 \cos\theta}} \text{PSD}(\nu),$$

$$\nu = \frac{1}{\lambda} |\cos\theta - \cos\theta_0|,$$
(4)

где $t(\theta)$ - френелевский коэффициент прохождения излучения, ε - диэлектрическая проницаемость материала. В лабораторных экспериментах (4) может быть применено при

условии использования достаточно широкой горизонтальной щели детектора $h_\varphi/l \gg \delta\varphi$ (что выполняется почти всегда). При этом регистрируемая интенсивность рассеянного сигнала $I(\theta)$ связана с $\Pi(\theta)$ соотношением $I(\theta)=\Pi(\theta) \cdot h_\theta/l$.

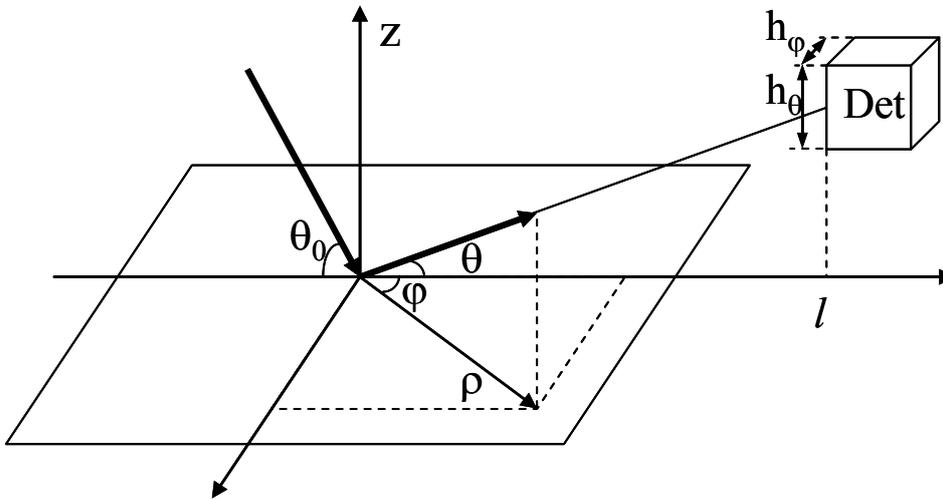


Рисунок 6.1. Схема рассеяния излучения.

Спектр пространственных частот метода (4) определяется величиной отстройки $|\theta - \theta_0|$, при которой измеренные значения индикатрисы рассеяния можно считать достоверными. Область низких пространственных частот ($\theta \rightarrow \theta_0$) ограничена аппаратной функцией прибора (шириной зеркального пика и размером щели детектора). При характерных размерах пучка 45 мкм, щели 100 мкм, и расстоянии от образца до детектора 320 мм, $\theta_0 = 0,18^\circ$, $\lambda = 0,154$ нм, минимальная пространственная частота ограничена величиной $7,4 \cdot 10^{-2}$ мкм⁻¹. При продвижении в область больших отстроек эксперимент становится все менее точным из-за малой интенсивности отраженного сигнала (в большинстве экспериментов по малоугловому рассеянию отношение отраженного сигнала к фоновому излучению и шуму детектора составляет $\sim 10^5 - 10^6$). В нашем случае максимальная пространственная частота составила ~ 1 мкм⁻¹.

При анализе полученных PSD-функций будем использовать так называемую ABC-модель, хорошо описывающую поверхность сверхгладких подложек [86]:

$$\text{PSD}(\nu) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(h+1/2)}{\Gamma(h)} \frac{\sigma^2 a}{(1+a^2\nu^2)^{h+1/2}}, \quad (5)$$

где $h \in [0;1]$ – фрактальный параметр (параметр Хёрста), a – корреляционная длина, значение σ соответствует среднеквадратичной высоте шероховатостей, определяемой как $\sigma^2 \equiv C(0) = \int_0^{\infty} PSD(\nu) d\nu$. В области больших частот (5) переходит в

$$PSD(\nu \rightarrow \infty) = \frac{Const}{\nu^{2h+1}}, \quad (6)$$

что в двойном логарифмическом масштабе выглядит как прямая.

На практике, однако, PSD-функция может быть определена только в интервале частот $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, ограниченном возможностями конкретного метода. Для удобства вводится также эффективное значение шероховатости

$$\sigma_{eff}^2 = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} PSD(\nu) d\nu. \quad (7)$$

Такая величина может быть рассчитана и для PSD-функций, полученных методами ОИМ и АСМ. При этом полученное значение, вообще говоря, может оказаться несколько меньше рассчитанного по (2), поскольку процедура построения PSD сглаживает «выбросы» на карте поверхности.

Еще один метод, широко применяемый для характеристики поверхности подложек и многослойных элементов – зеркальное отражение рентгеновского излучения (ЗО). Для шероховатой поверхности угловая зависимость коэффициента отражения $R(\theta)$ определяется

$$R(\theta) = R_F(\theta) \exp\left(-\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sigma_{30} \sin\theta\right)^2\right), \quad (8)$$

где R_F – френелевский коэффициент зеркального отражения. Используя (8), величину шероховатости σ_{30} можно определить, измеряя кривую отражения от материала с известными рентгенооптическими характеристиками. В данной работе эксперименты по отражению и рассеянию рентгеновского излучения проводились на дифрактометре Phillips X'Pert PRO ЦКП ИФМ РАН на длине волны Cu K α $\lambda = 0,154$ нм по методике, описанной в [80].

В отличие от рассеяния, в отраженный сигнал шероховатости всех высоких пространственных частот вносят вклад интегрально. Это нетрудно понять, если представить себе поверхность подложки в виде совокупности дифракционных решеток разных периодов. При этом отраженный сигнал будет соответствовать нулевому порядку дифракции, рассеянный – различным дифракционным пикам. Доступность рентгеновских

дифрактометров, простота и скорость проведения экспериментов делает его одним из наиболее удобных способов аттестации подложек.

6.1.3 Экспериментальная часть

На первом этапе работы методы АСМ, рентгеновского отражения и интерференционной микроскопии были применены для вычисления среднеквадратичного значения шероховатости ансамбля кварцевых подложек (см. таблицу 6.1). Экспериментально изучались кварцевые подложки фирмы General Optics.

Можно видеть, что полученные разными методами значения различаются довольно существенно, хотя определенная корреляция с точки зрения «лучше-хуже» наблюдается. Вместе с тем, цель исследования подложек состоит в отборе сверхгладких образцов для последующего нанесения многослойных зеркал, поэтому необходимо установить причину расхождений полученных результатов и понять, как их следует интерпретировать правильно.

Таблица 6.1 Сравнение значений среднеквадратичной высоты шероховатости ансамбля кварцевых подложек, полученных различными методами. R – пиковый коэффициент отражения нанесенных Mo/Si зеркал при $\lambda = 13,5$ нм.

Подложка	Шероховатость, нм			R _{13,5} , %
	Рентгеновское отражение	АСМ, 1×1 мкм	Оптический интерферометр Talysurf	
GO_0	0,4	0,08	0,92	67,5%
GO_3	0,6	0,15	0,92	66,8%
GO_4	0,65	0,18	0,97	-
GO_2	0,7	0,20	1,0	-
GO_1	1,1	0,28	1,02	49,2%

Отметим, что подобное расхождение отмечалось и раньше [83, 87]. Одно из известных объяснений состоит в негауссовом характере распределения шероховатостей по высотам [87]. В этом случае использование среднеквадратичного отклонения для описания процесса рассеяния теряет смысл, формула (8) оказывается неприменима. Этот вывод, однако, не подтверждается хорошим совпадением кривых отражения, измеренной и рассчитанной согласно (8). Более того, гистограмма высот шероховатостей, полученная

в результате анализа АСМ изображения (рис. 6.2 сверху), имеет вид нормального распределения.

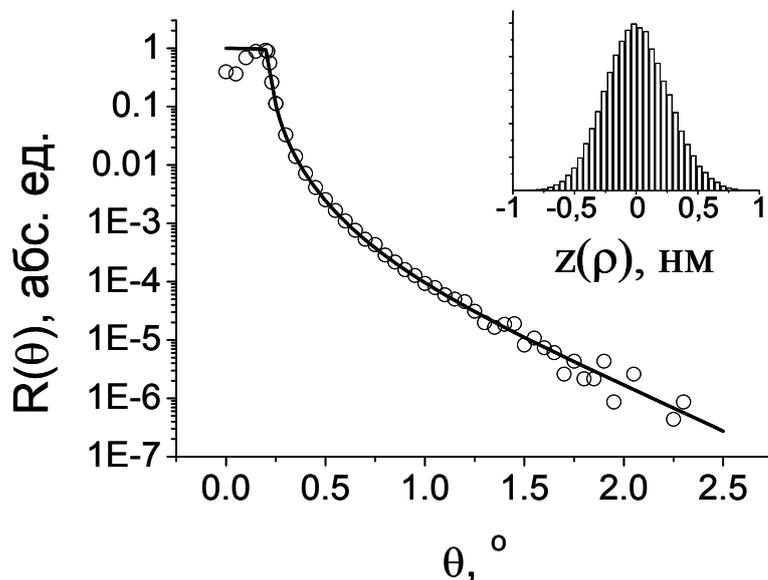


Рисунок 6.2. Угловая зависимость коэффициента отражения $R(\theta)$ кварцевой подложки GO, $\lambda = 0,154$ нм (реальный шаг эксперимента $0,01^\circ$). Сплошная линия – расчет по (7) для $\sigma_{30} = 0,48$ нм. Справа сверху – гистограмма распределения высот, полученная по данным АСМ.

Второе объяснение расхождения полученных результатов - наличие переходной области в приповерхностном слое. Считается, что в этом случае метод АСМ оказывается поверхностно-чувствительным, в то время как рентгеновское отражение захватывает приповерхностную область. При этом, однако, не вполне понятно, что такое переходная область с точки зрения АСМ, когда речь идет о масштабах порядка долей нанометров. Неясно также, почему в этом случае наблюдается совпадение с методом диффузного рассеяния рентгеновского излучения, отмеченное во многих работах [85,87,88]: чувствительность диффузного рассеяния к переходному слою должна быть аналогична методу рентгеновского отражения.

Аргументом, подтверждающим адекватность метода зеркального рентгеновского отражения при описании микрошероховатостей подложек, является эксперимент по нанесению на эти подложки многослойных Mo/Si покрытий. В последнем столбце таблицы 6.1 приведены коэффициенты отражения $R_{13,5}$ таких зеркал на длине волны 13,5 нм. Из таблицы видна четкая корреляция между значениями $R_{13,5}$ и данными шероховатости, полученными при анализе угловых зависимостей коэффициентов

«жесткого» рентгеновского отражения. Если исходить из данных АСМ, то шероховатость всех подложек должна была обеспечивать высокие коэффициенты отражения. Наоборот, по данным оптической интерферометрии высоких значений $R_{13,5}$ ожидать не приходится.

На примере выбранного образца GO (SiO_2) проведем полный анализ свойств шероховатой поверхности, построим PSD-функцию во всем доступном диапазоне частот.

На рис. 6.2 приведена кривая отражения, снятая при интенсивности зондирующего пучка $I_0 \sim 70000$ квант/с и времени усреднения 15 секунд. Расчетная кривая построена в соответствии с (8), при $\sigma_{30} = 0,48$ нм наблюдается хорошее совпадение теории и эксперимента (расхождение вблизи нулевого угла падения связано с реальной геометрией пучка).

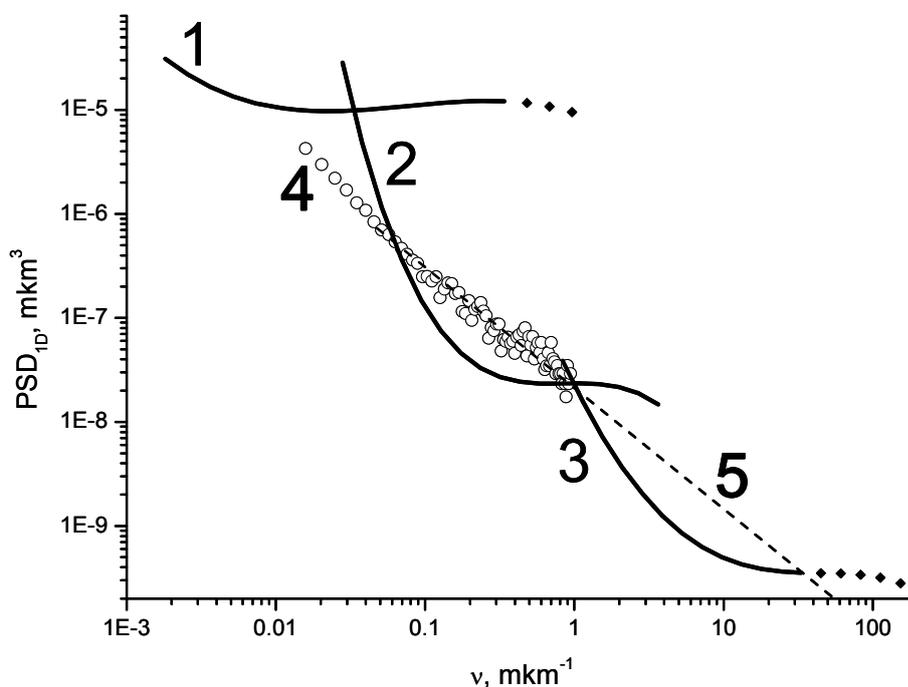


Рисунок 6.3 Одномерные PSD-функции, построенные по данным различных методов. 1 – оптический интерферометр ($L = 450$ мкм, $N = 512$); 2 – АСМ, размер кадра $L = 30$ мкм ($N = 256$); 3 - АСМ, размер кадра $L = 1$ мкм ($N = 256$); 4 – диффузное рассеяние, 5 – линейная интерполяция в область высоких частот.

При изучении поверхности АСМ-методом были сняты кадры 1×1 мкм² и 30×30 мкм², $N = 256$, что, в свою очередь, позволило захватить более широкий частотный диапазон при построении PSD-функции (рис. 6.3). Полученные результаты подтвердили,

во-первых, растущую зависимость $\sigma_{АСМ}$ от размера кадра [85]: $\sigma_{АСМ}^{1 \times 1} = 0,26 \text{ нм}$, $\sigma_{АСМ}^{30 \times 30} = 0,91 \text{ нм}$. При вычислении согласно (7) для тех же кадров были получены значения 0,18 нм и 0,55 нм соответственно.

Для Talysurf размер кадра составлял $450 \times 450 \text{ мкм}$, $N = 512$, $\sigma_{ОИМ}^{450 \times 450} = 2,7 \text{ нм}$, уточненное при интегрировании PSD-функции значение 1,9 нм.

Рассеяние рентгеновского излучения с длиной волны 0,154 нм исследовалось при угле падения $\theta = 0,18^\circ$ (для кварца $\theta_c = 0,216^\circ$) при вертикальной щели на детекторе $h_\theta = 100 \text{ мкм}$, горизонтальной $h_\varphi = 5 \text{ мм}$ и времени усреднения 60 секунд (рис. 6.4). PSD-функция, построенная согласно (4), приведена на рис. 6.3. Можно видеть, что кривые, полученные по данным АСМ и рентгеновского рассеяния, довольно близки. Эффективное значение шероховатости для охваченного диапазона частот составило $\sigma_{eff} = 0,37 \text{ нм}$. Отметим, что для высоких частот PSD-функция хорошо описывается линейной зависимостью, то есть совпадает с (6) при значении $h=0,18$. Если полученную прямую

продлить в область больших значений ν и вычислить $\sigma_\infty^2 = \int_{\nu_{min}=0,7 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^{-1}}^{\infty} PSD(\nu) d\nu$, то

высота шероховатости составит $\sigma_\infty = 0,46 \text{ нм}$, что хорошо совпадает с интегральной шероховатостью, рассчитанной для данной подложки по отражению рентгеновского излучения. Значение ν_{min} соответствует минимальной частоте, вносящей вклад в кривую зеркального отражения, и определяется размером щели: гармоники с $\nu < \nu_{min}$, рассеивают излучение на углы меньшие, чем угловая ширина детектора, а следовательно, не снижают измеряемое значение $R(\theta)$.

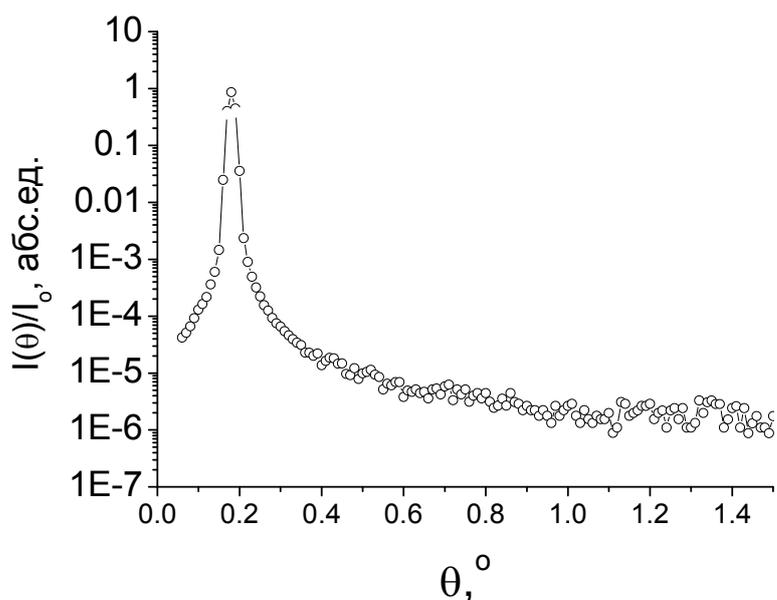


Рисунок 6.4. Интенсивность рассеянного сигнала $I(\theta)/I_0$ для кварцевой подложки GO, $\theta_0 = 0,18^\circ$, $\lambda = 0,154$ нм.

6.1.4 Обсуждение результатов

На основе приведенных экспериментальных данных можно сделать следующие основные выводы по проблеме аттестации шероховатости сверхгладких подложек для многослойной рентгеновской оптики.

Во-первых, практически полную корреляцию между измеренными значениями шероховатости подложек и коэффициентами отражения многослойных зеркал, нанесенных на эти подложки, демонстрирует метод зеркального отражения жесткого рентгеновского излучения. При этом подложки, для которых зависимость $R(\theta)$ существенно отличается от приведенной на рис. 6.2, не рассматриваются, поскольку для задач многослойной рентгеновской оптики они не применимы: подобные отклонения появляются или из-за наличия посторонней пленки, или нарушенного слоя на поверхности, что приводит к непредсказуемым свойствам наносимых многослойных покрытий и, соответственно, коэффициентов отражения. Адекватность этой методики определяется малой длиной волны излучения («зонд субнанометрового размера») и чувствительностью практически ко всем пространственным частотам.

Данные диффузного рассеяние «жесткого» рентгеновского излучения и атомно-силовая микроскопия могут применяться для изучения шероховатости сверхгладких поверхностей только при условии изучения PSD-функций и их аппроксимации на весь спектр пространственных частот. Широко используемые данные $\sigma_{АСМ}$, полученные в узком частотном диапазоне, могут приводить к ошибке при заключении о годности или негодности подложки для рентгенооптических приложений.

Интерференционная оптическая микроскопия, на наш взгляд, не может применяться для характеристики сверхгладких поверхностей в лабораторных условиях. По-видимому, на результаты исследований значительное влияние оказывают качество эталонов и объективов микроскопа, а также внешние условия (прежде всего вибрации).

Серьезным недостатком метода зеркального рентгеновского отражения является интегральный характер результата, то есть отсутствие информации о частотном спектре шероховатостей, что особенно актуально в связи с задачей изготовления сверхгладких подложек для EUV-литографии.

Подобные данные, как уже отмечалось, могут быть получены методом диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения. При этом низкочастотная отсечка спектра может достигать 10^{-3} мкм⁻¹, полностью покрывая рабочий диапазон интерференционного микроскопа со стороны низких частот и перекрывая его – в высокочастотной области. Несмотря на это, частотные ограничения метода все же достаточно сильны: $\nu_{max} \sim 1$ мкм⁻¹, что определяется слабой поляризуемостью вещества в этом диапазоне и, как следствие, быстрым падением интенсивности рассеянного излучения при отстройке от зеркально отраженного сигнала.

Необходимо отметить также, что подложки для изображающей оптики экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазона, как правило, имеют неплоскую форму поверхности. При этом стрелка прогиба может достигать нескольких десятков миллиметров, а внешний диаметр варьируется от нескольких до сотен миллиметров. Для таких поверхностей практически исключено применение жесткого рентгеновского излучения и интерференционной микроскопии и требуется применение нестандартных схем атомно-силовых микроскопов, как правило, в ущерб качеству измерений и с риском повредить уникальные подложки. Кроме того, для полноценной аттестации во всем спектре пространственных частот в любом случае требуется применение как минимум двух различных методик (и дорогостоящих приборов), что неэффективно и зачастую недоступно для большинства лабораторий. Поэтому, несмотря на очевидные успехи традиционных методов исследования шероховатых поверхностей,

приходится констатировать отсутствие на данный момент достоверной и универсальной методики аттестации супергладких подложек для изображающей рентгеновской оптики.

Решение проблемы на данный момент видится в применении метода диффузного рассеяния в «мягком» рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах.

Таким образом, анализ возможностей стандартных методов исследования шероховатых поверхностей применительно к изучению супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики показал, что наибольшей адекватностью обладает метод зеркального отражения. Диффузное рассеяние и АСМ могут применяться только при условии аппроксимации PSD-функций на весь спектр пространственных частот.

6.2 Двухзеркальный проекционный объектив нанолитографа на $\lambda=13,5$ нм

По сравнению с плоской подложкой асферический объектив оказывается на много более сложным объектом для характеристики. Для аттестации волновых деформаций объектива, а также его отдельных элементов на стадии изготовления был разработан интерферометр [89], использующий в качестве эталонного фронта сферическую волну, возникающую в результате дифракции света на выходе одномодового оптического волокна с зауженной до субволновых размеров выходной апертурой [90].

Коррекция формы подложек для зеркал до субнанометровых точностей осуществлялась методами локального ионно-пучкового травления и напыления тонких пленок [91].

Для повышения энергетической эффективности и поля зрения проекционного объектива была выбрана простейшая двухзеркальная схема Шварцшильда с асферическими зеркалами (вогнутое M2 и выпуклое M1). Расчет параметров объектива, включая коэффициенты при высших порядках асферики и допустимые отклонения параметров от номинальных значений, производился с помощью программы ZEMAX. Результаты расчетов представлены в [92].

Форма вогнутого асферического зеркала M2 отличается от ближайшей сферы примерно на 6,7 мкм. Эксперимент показал, что прямое применение интерферометра со сферической эталонной волной оказалось невозможным для аттестации его формы. Во-первых, число интерференционных полос достигало почти 100, что сильно затрудняло определение положения минимумов.

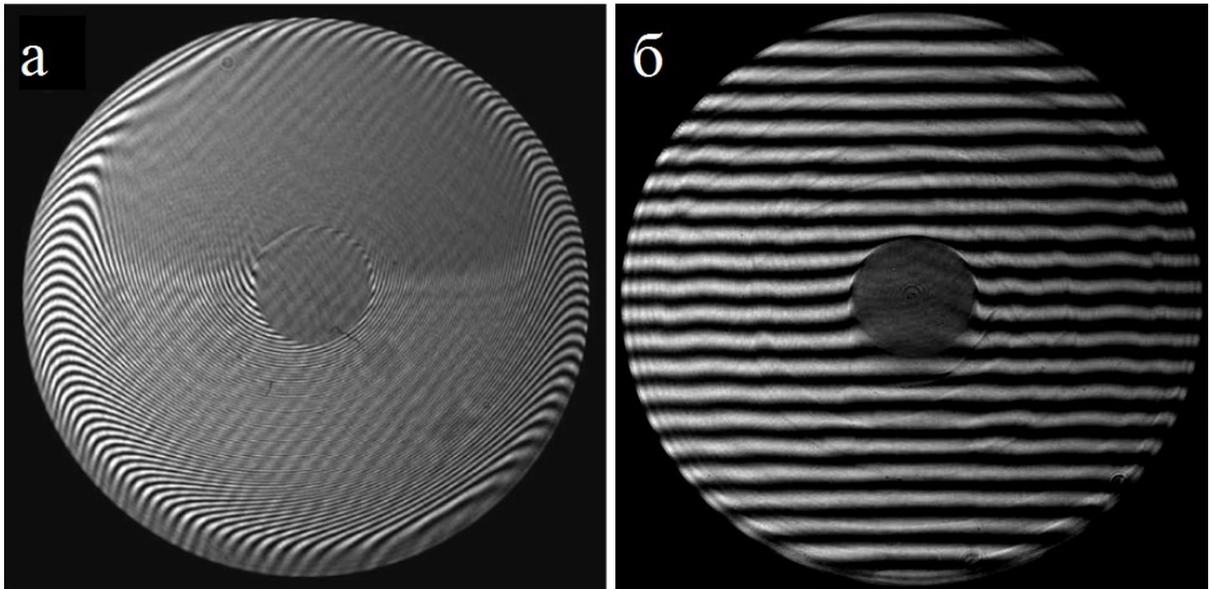


Рисунок 6.5. Интерферограммы асферического зеркала M2 нанолитографа: а) полученная при стандартном способе регистрации с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения; б) – с использованием компенсатора.

Во-вторых, из-за большого диаметра пятна фокусировки в области источника эталонной сферической волны, рис. 6.5 а, почти половина интерференционной картины отсутствует. Для решения этой проблемы был разработан и применен корректор (компенсатор) волнового фронта, рис. 6.6 (поз. 11), преобразующий сферический фронт в асферический по форме совпадающей с исследуемой асферикой. Как видно из рис. 6.5 б, применение компенсатора позволило получить интерферограмму, которую можно надежно обрабатывать.

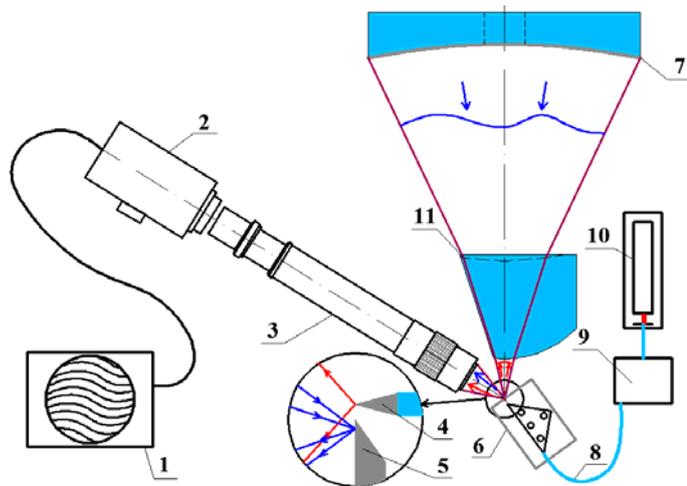


Рисунок 6.6. Схема аттестации асферического зеркала M2. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 7 – асферическое зеркало M2; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – оптический компенсатор.

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

Другим фактором, влияющим на деформацию прошедшего волнового фронта, является неидеальность его поверхностей. Компенсатор имеет две сферические поверхности (они должны быть только сферическими, чтобы их можно было аттестовать с помощью интерферометра со сферической эталонной волной): вогнутую и выпуклую. Измерение вогнутой поверхности производится классическим способом [89]. Аттестация выпуклой поверхности компенсатора производится с помощью 6-ти линзового объектива в два этапа. На первом этапе делается измерение aberrаций объектива при прохождении через него эталонной сферической волны по схеме, показанной на рис. 6.7. На втором этапе измеряется непосредственно сама форма выпуклой поверхности, см. рис. 6.8, а из полученной карты вычитаются aberrации объектива.

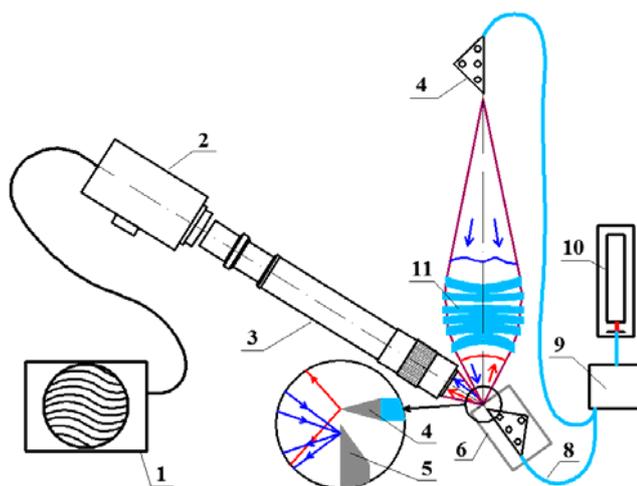


Рисунок 6.7. Схема аттестации 6-ти линзового объектива. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – оптический компенсатор.

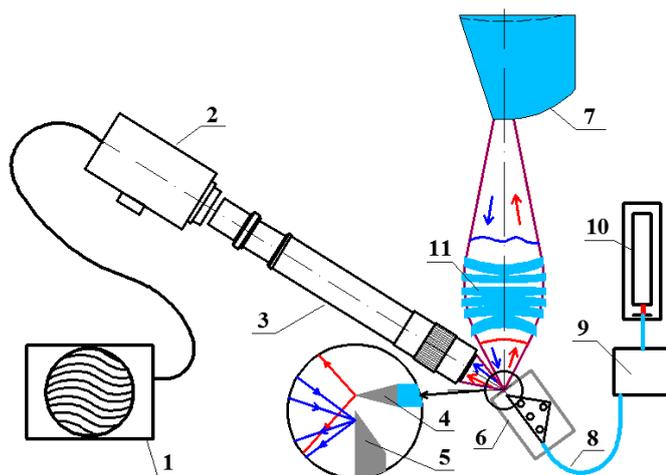


Рисунок 6.8. Схема аттестации вогнутой поверхности компенсатора с помощью 6-ти линзового объектива. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 3 – наблюдательная система; 4 – источник эталонной сферической волны; 5 – плоское зеркало; 6 – 3D-стол; 7 – оптический компенсатор; 8 – одномодовое оптическое волокно; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – 6-ти линзовый объектив.

При аттестации асферического зеркала M2 учитываются неидеальности поверхностей компенсатора. На рис. 6.9 показаны результаты измерений и корректировки асферического зеркала M2.

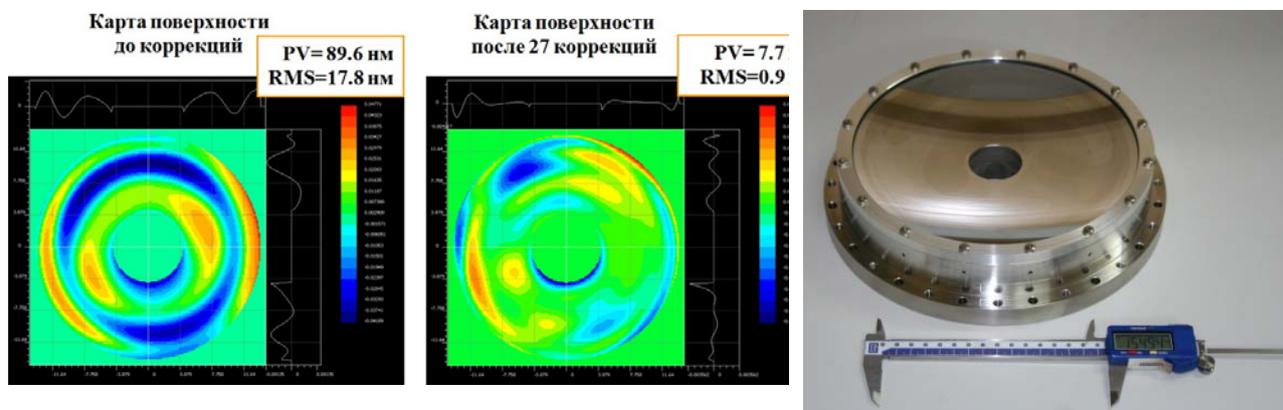


Рисунок 6.9. Карта поверхности асферического зеркала M2 до и после 27 коррекций, слева, и фотография – справа.

На рисунке слева показана карта поверхности до коррекции, справа – после 27 коррекций. Видно, что параметры улучшились более чем на порядок, а среднеквадратичная деформация составила 0,9 нм.

Для изучения формы выпуклого асферического зеркала M1 наряду с необходимостью преобразования сферического фронта в асферический, возникло

дополнительное требование - преобразовать расходящийся фронт в сходящийся. Как показал теоретический анализ, подход с использованием в качестве корректора одной «толстой» линзы с двумя сферическими поверхностями, примененный для аттестации вогнутой асферики, оказался не применим для выпуклого асферического зеркала.

Для аттестации формы выпуклого зеркала с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения в качестве корректора волнового фронта было использовано вогнутое асферическое зеркало M2, аттестованное предыдущим способом. Оптическая схема интерферометра для измерений выпуклого зеркала приведена на рис. 6.10. Необходимо также отметить, что эта схема используется и при юстировке, и при аттестации волновых aberrаций объектива.

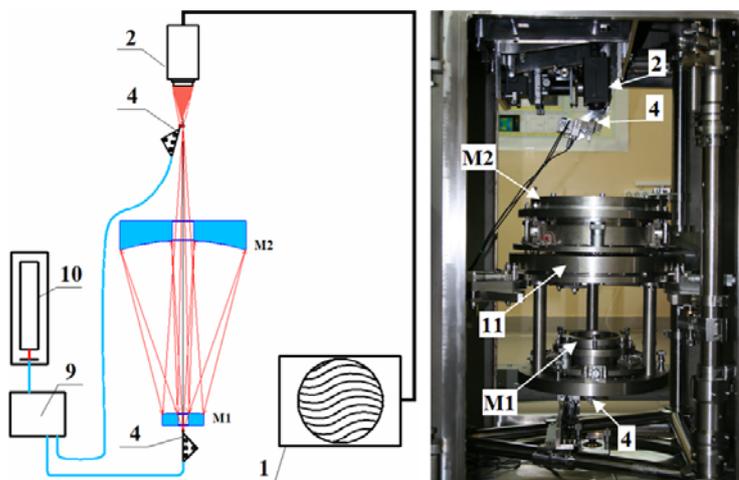


Рисунок 6.10. Схема аттестации 2-х зеркального объектива в интерферометре. 1 – компьютер; 2 – CCD-камера; 4 – источник эталонной сферической волны; 9 – поляризационный контроллер; 10 – лазер; 11 – 2-х зеркальный объектив; M1 и M2 – асферические зеркала.

С помощью этих методов были изготовлены зеркала для проекционного объектива нанолитографа. Фотография асферического зеркала M1 и карты волновых деформаций объектива до и после 27 коррекций показаны на рис.5.11. Видно, что параметры объектива улучшились на порядок, а $rms_{об}=1,9\text{нм}$, что эквивалентно волновым aberrациям $\sim \lambda/7$.

Так же необходимо отметить, что при создания сверхточной оптики встал вопрос о ее креплении в механические оправы. Проблема заключалась в том, что при малейшем механическом воздействии на подложку, даже когда она просто лежит под собственным весом, форма поверхности деформируется с субнанометрового уровня до десятков нанометров. В рамках данной работы эта проблема также была решена. Подробно это описано в [93].

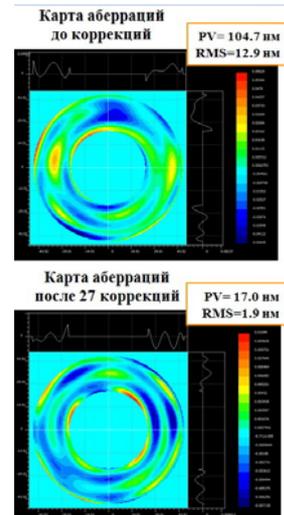


Рисунок 6.11. Фотография асферического зеркала M1 и карты волновых деформаций объектива до и после 27 коррекций зеркала M1.

Объектив, фотография которого приведена на рис. 6.10, был собран из инвара с низким, на уровне 10^{-6} , температурным коэффициентом линейного расширения. Для коррекции положения зеркал в пространстве с нанометровой точностью используются пьезо-актуаторы, обеспечивающие перемещение с дискретностью 1 нм в диапазоне 30 мкм. Для контроля положения зеркал применяются емкостные датчики, ответные обкладки которых установлены на тыльные стороны зеркал. Другие обкладки датчиков жестко установлены на ситалловых колоннах, температурный коэффициент линейного расширения которых составляет 2×10^{-8} . Такая конструкция обеспечивает сохранность положения зеркал на требуемом уровне в достаточно большом температурном интервале.

В настоящее время объектив установлен в нанолитограф.

К основным результатам данной работы можно отнести следующее:

- 1) Впервые в России создан проекционный объектив нанолитографа с волновыми aberrациями $\sim \lambda/7$ на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм, что уже позволяет получить изображение с разрешением 40-60 нм
- 2) Разработаны методики аттестации сферических и асферических поверхностей, и волновых aberrаций объективов с субнанометровой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, запланированные на этап 1 госконтракта № №16.552.11.7007 от "29" апреля 2011г. по теме "Развитие центром коллективного пользования научным оборудованием комплексных исследований в области формирования и исследования многослойных наноструктур на основе Si, GaAs и GaN для пассивных и активных элементов наноэлектроники и нанофотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн", выполнены.

Проведены научные исследования и работы по развитию ЦКП ИФМ РАН. По литературным источникам изучено современное состояние исследований в этой области, составлен аналитический обзор (раздел 1 отчета). Изучены патенты в этой области, составлен отчет о патентных исследованиях (раздел 2). Сделан вывод о перспективности выбранного направления исследований.

Выполнен запланированный объем теоретических исследований по низкобарьерным полупроводниковым диодам (раздел 3). В частности, методами численного моделирования изучены процессы электронного транспорта в низкобарьерном диоде Мотта. Исследованы эффекты, связанные с квазибаллистическим движением электронов. Получены вольт-амперные характеристики диода. Проведен сопоставительный анализ результатов моделирования, выполненного с использованием различных подходов (в локально-полевой модели, методом Монте-Карло). Проведено сравнение расчетных вольт-амперных характеристик с экспериментальной зависимостью. Определены границы применимости использованных подходов. Предложена методика выращивания структур для низкобарьерных диодов методом газофазной эпитаксии.

Выполнены работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур», на которые приходится основной объем финансирования (раздел 4). Они включали в себя:

- маркетинговые исследования по покупаемому оборудованию;
- формирование технических условий и объявление тендеров на закупку по позициям первого года. Были проведены тендеры и заключены контракты на закупку: рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discovery, лазерного литографа μ PG101, источника бесперебойного питания Smart-UPS к электронному микроскопу и высоковакуумной установки исследования многослойных наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности СММ-2000.

Выполнены исследования в интересах сторонних организаций и разработки по совершенствованию методик исследований на оборудовании ЦКП, раздел 5. В частности, изучена чувствительность масс-спектрометра TOF.SIMS-5 к матричным элементам в слоях GeSi при регистрации комплексных ионов и отработан количественный безэталоный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}\text{Si}$ в кремнии методом ВИМС на приборе TOF.SIMS-5.

Выполнены экспериментальные исследования по литографии экстремального ультрафиолета, перспективные для повышения плотности элементов схем, формируемых литографическими методами (раздел 6 отчета). Применительно к изучению супергладких подложек для многослойной рентгеновской оптики нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм проанализированы возможности стандартных методов исследования шероховатых поверхностей. Показано, что наибольшей адекватностью обладает метод зеркального отражения. Диффузное рассеяние и атомно-силовая микроскопия могут применяться только при условии аппроксимации функций плотности спектра шероховатости на весь спектр пространственных частот. Описывается проекционный объектив для стенда нанолитографа, состоящий из 2-х асферических зеркал и процедуры аттестации формы поверхности зеркал и aberrаций объектива с субнанометровой точностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Божков В.Г. Полупроводниковые детекторы, смесители и умножители частоты терагерцового диапазона // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. - № 8-9. – С. 702-731.
- 2 Brown E.R. Fundamentals of Terrestrial Millimeter-Wave and THz Remote Sensing // International Journal of High Speed Electronics and Systems. – 2003. – V. 13. – NO. 4. – P. 995-1097.
- 3 D.L. Woolard, E.R. Brown, M. Pepper, and M. Kemp. Terahertz Frequency Sensing and Imaging: A Time of Reckoning Future Applications? // Proceedings of the IEEE. – 2005. – V. 93. – NO. 10. – P. 1722-1743.
- 4 Wai Lam Chan, Jason Deibel and Daniel M Mittleman Imaging with terahertz radiation // Rep. Prog. Phys. – 2007. – V. 70 – P. 1325–1379.
- 5 Appleby R. Passive millimetre-wave imaging and how it differs from terahertz imaging // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2004. – V. 362. – P. 379–394.
- 6 Larry Yujiri, Merit Shoucri, and Philip Moffa. Passive Millimeter-Wave Imaging // IEEE microwave magazine. – 2003. – No. 9. – P. 39-50.
- 7 Nicholas Karpowicz, Hua Zhong, Cunlin Zhang, Kuang-I Lin, Jenn-Shyong Hwang, Jingzhou Xu, and X.-C. Zhang. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications // Appl. Phys. Lett. – 2005. – V. 86. – P. 054105.
- 8 N. Su, R. Rajavel, P. Deelman, J.N. Schulman, and P. Fay. Sb-Heterostructure Millimeter-Wave Detectors With Reduced Capacitance and Noise Equivalent Power // IEEE Electron Devices Letters. – 2008. – V. 29. – NO 6. – P. 536-539.
- 9 J.J. Lynch, H.P. Moyer, J.H. Schaffner, Y. Royter, M. Sokolich, B. Huges, Y.J. Yoon, J.N. Schulman. Passive Millimeter Wave Imaging Module With Preamplified Zero-Bias Detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – V. 56. – NO. 7. – P. 1592-1600.
- 10 Thomas W. Crowe, Tatiana Globus, Dwight L. Woolard and Jeffrey L. Hesler. Terahertz sources and detectors and their application to biological sensing // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2004. – V. 362. – P. 365–377.
- 11 E.R. Brown. A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays. Solid-State Electronics, v.48, 2051 (2004).
- 12 S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger. Barrier height engineering on GaAs THz Schottky diodes by means of high-low doping, InGaAs- and InGaP-layers. IEEE Transaction on Electron.Devices, v.47, 24 (2000).

- 13 M.J. Kearney, and I. Dale. GaAs planar doped barrier diodes for mixer and detector applications. *GEC J. Res.*, v.8, N1, 1 (1990).
- 14 Zhirun Hu, Van Tuyen Vo, and Ali A. Rezazadeh. High Tangential Signal Sensitivity GaAs Planar Doped Barrier Diodes for Microwave/Millimeter-Wave Power Detector Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 15, N3, 150 (2005).
- 15 R.G. Meyers, P. Fay, J.N. Schulman, et al. Bias and temperature dependence of Sb-based heterostructure millimeter-wave detectors with improved sensitivity. *IEEE Electron Devices Letters*, v. 25, N1, 4 (2004).
- 16 P. Chahal, F. Morris, and G. Frazier. Zero bias resonant tunnel Schottky contact diode for wide-band direct detection. *IEEE Electron Device Letters*, v.26, N12, 894 (2005).
- 17 A.C. Young, J.D. Zimmerman, E.R. Brown, and A.C. Gossard. Semimetal-semiconductor rectifiers for sensitive room-temperature microwave detectors. *Appl. Phys. Lett.* v. 87, 163506 (2005).
- 18 G. P. Gauthier, W. Y. Ali-Ahmad, T. P. Budka et al. A uniplanar 90-GHz Schottky-diode millimeter-wave receiver. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v.43, N 7, 1669 (1995).
- 19 Gildas P. Gauthier, Jean-Pierre Raskin, Linda P. B. Katehi, and Gabriel M. Rebeiz. A 94-GHz Aperture-Coupled Micromachined Microstrip Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v.47, N 12, 1761 (1999).
- 20 J. Lynch, H. Moyer, J. Schulman et al Unamplified direct detection sensor for passive millimeter wave imaging. *Proceeding of SPIE*, v.6211, 62110I-1-7 (2006).
- 21 S. Clark, C. Martin, V. Kolinko, J. Lovberg, and P. J. Costianes. A Real-time Wide field of View Passive Millimeter-wave Imaging Camera. *Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR'03)*, 0-7695-2029-4/03 (2003).
- 22 В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, Ю.И. Чеченин. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики, *Известия вузов. Радиофизика*. 2005. Т.48. № 6. С. 544-551.
- 23 Модинос А. Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия // М.: Наука, 1990. – 320 С.
- 24 Mott N.F. The theory of crystal rectifiers // *Proc. Roy. Soc.* – 1939. - A 171. – P. 27-38.
- 25 Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах // М.: Мир. – 1973. - 416 С.
- 26 В.И. Шашкин, А.В. Мурель, Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин Управление эффективной высотой барьера в эпитаксиальных структурах Al/n-

- GaAs, изготовленных в едином цикле МОГФЭ // Микрoэлектроника. – 1997. - Т. 26. - В. 1. - С. 57-61.
- 27 В.И. Шашкин, А.В. Мурель, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью δ -легирования: расчёт и эксперимент для Al/GaAs // Физика и техника полупроводников. –2002. - Т. 36. - В. 5. - С. 537-542.
- 28 В.И. Шашкин, А.В. Мурель Диагностика низкобарьерных диодов Шоттки с приповерхностным δ -легированием // Физика и техника полупроводников. – 2008. - Т.42. - В. 4. - С. 500-502.
- 29 В.И. Шашкин, А.В. Мурель Теория туннельного токопереноса в контактах металл-полупроводник с приповерхностным изотипным дельта-легированием // Физика и техника полупроводников. – 2004. - Т. 38. - В. 5. - С. 574-579.
- 30 В.И. Шашкин, А.В. Мурель. Вольт-амперная характеристика контакта металл-полупроводник с барьером Мотта // Физика твёрдого тела. – 2008. - Т. 50. - В. 3. - С. 519-522.
- 31 В.И. Шашкин, А.В. Мурель. Свойства контактов Мотта с ультра малым барьером металл-полупроводник // Физика твёрдого тела. - 2008. – Т. 50. - В. 10. - С. 1883-1887.
- 32 В.И. Шашкин, Н.В. Востоков Решение задачи инжекции носителей тока в изолирующий слой при самосогласованных граничных условиях на контактах // Физика и техника полупроводников. - 2008. - Т. 42. - В. 11. - С. 1339-1344.
- 33 V.I. Shashkin, N.V. Vostokov. Analytical solution for charge-carrier injection into an insulating layer in the drift diffusion approximation // Journal of Applied Physics. - 2008. – V. 104. – P. 123708.
- 34 N. F. Mott, Proc. Cambr. Phil. Soc. 34, 568 (1938).
- 35 N. F. Mott, Proc. Roy. Soc. A 171, 27 (1939).
- 36 E. H. Rhoderick and R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts (Clarendon, Oxford, 1988).
- 37 S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (Wiley, New York, 1969).
- 38 M. McColl and M. F. Millea, Proc. IEEE 61, 499 (1973).
- 39 V. I. Shashkin and Yu. A. Drjagin, V. R. Zakamov, S. V. Krivov, L. M. Kukin, A. V. Murel, and Y. I. Chechenin, Int. J. Infrared Millimeter Waves 28, 945 (2007).
- 40 V. I. Shashkin, A. V. Murel', Yu. N. Drozdov, V. M. Danil'tsev, and O. I. Khrykin, Russ. Microelectron. 26, 49 (1997).

- 41 V. I. Shashkin, A. V. Murel', V. M. Danil'tev, and O. I. Khrykin, *Semiconductors* 36, 505 (2002).
- 42 V. I. Shashkin and N. V. Vostokov, *J. Appl. Phys.* 106, 043702 (2009).
- 43 C. Jacoboni and L. Reggiani, *Rev. Mod. Phys.* 55, 645 (1983).
- 44 D. Vasileska and S. M. Goodnick, *Mater. Sci. Eng. R* 38, 181 (2002).
- 45 L. Sun, X. Y. Liu, M. Liu, G. Du and R. Q. Han, *Semicond. Sci. Technol.* 18, 576 (2003).
- 46 L. Zeng, Z. Xia, G. Du, J. Kang, R. Q. Han and X. Liu, *IEEE Trans. Nanotechnol.* 8, 10 (2009).
- 47 R. Rengel, E. Pascual and M. J. Martin, *IEEE Electron Device Lett.* 28, 171 (2007).
- 48 S. G. Murphy and R. H. Good, *Phys. Rev.* 102, 1464 (1956).
- 49 V. I. Shashkin and A. V. Murel, *Semiconductors* 38, 554 (2004).
- 50 M. Shur, *GaAs Devices and Circuits* (Plenum, New York, 1987).
- 51 Божков В.Г. Полупроводниковые детекторы, смесители и умножители частоты терагерцового диапазона / В.Г. Божков // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. - № 8-9. – С. 702-731.
- 52 Crowe T.W. Terahertz sources and detectors and their application to biological sensing / Thomas W. Crowe, Tatiana Globus, Dwight L. Woolard and Jeffrey L. Hesler // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* – 2004. – V. 362. – P. 365–377.
- 53 Шашкин В.И. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики / В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, Ю.И. Чеченин // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. - Т. 48. - № 6. - С. 544-551.
- 54 Брянцева Т.А. Диоды Шоттки с пониженным барьером на основе тонкопленочных контактов Au+Ge/GaAs / Т.А. Брянцева, В.Е. Любченко, Е.О. Юневич // *Радиотехника и электроника.* – 1995. – В. 8. – С. 1306 – 1310.
- 55 Sassen S. Barrier height engineering on GaAs THz Schottky diodes by means of high-low doping InGaAs- and InGaP- layers / S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger // *IEEE Transaction on Electron Devices.* – 2000. – V. 47. – P. 24-32.
- 56 Shashkin V.I. Planar Schottky Diodes with Low Barrier Height for Microwave Detector Application / V. Shashkin, Yu. Chechenin, V. Danilt'sev, O. Khrykin, A. Maslovsky, A. Murel, V. Vaks // *Proceedings of 23rd International Conference on Microelectronics, MIEL 2002.* Nis, Yugoslavia, May 12-15, 2002. - P. 335-338.
- 57 Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах / С. Зи // М.: Мир. 1984. – Кн. 1. - 456 С. Кн. 2. – 456 С.

- 58 Shashkin V. Microstructure and Properties of Aluminum Contacts Formed on GaAs(100) by Low Pressure Chemical Vapor Deposition with Dimethylethylamine Alane Source / V. Shashkin, S. Rushworth, V. Daniltsev, A. Murel, Yu. Drozdov, S. Gusev, O. Khrykin, N. Vostokov // *Journal of Electronic Materials*. – 2001. – V. 30. – N 8. – P. 980-986.
- 59 Шашкин В.И. Обобщённая теория токопереноса в низкобарьерных диодах Мотта с приповерхностным дельталегированием: сопоставление с экспериментом / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // *Микроэлектроника*, - 2010. - Т. 39. - №5. С.1-7.
- 60 Prutton M. *Introduction to surface physics*. Oxford: Clarendon Press, 1994. – 214 p.
- 61 Hossain Z. M., Jonathan B. F., Johnson H. T. // *J. Appl. Phys.* 2008. V.103, P. 073508.
- 62 Sanchez-Almazan F., Napolitani E., Carnera A., Drigo A.V., Isella G., von Kanel H., Berti M. // *Appl. Surf. Science*. 2004. V.231–232. P. 704–707.
- 63 Perego M., Ferrari S., Fanciulli M. // *Surface Science*. 2005. V.599. P. 141–149.
- 64 Kudriavtsev Yu., Villegas A., Godines A., Asomosa R. // *Appl. Surf. Sci.* 2003. V.206. P. 187-195.
- 65 Saha B., Chakraborty P. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2007. V. 258. P. 218–225.
- 66 Marseilhan D., Barnes J.P., Fillot F., Hartmann J.M., Holliger P. // *Appl. Surf. Sci.* 2008. V. 255. P. 1412–1414.
- 67 Gavelle M., Scheid E., Cristiano F., Armand C., Hartmann J.-M., Campidelli Y., Halimaoui A., Fazzini P.-F., Marcelot O. // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102, P. 074904.
- 68 Ковалев И.Д., Малышев К.Н., Потапов А.М., Сучков А.И. // *Журнал аналитической химии*, 2001, т.56, №5, с.496.
- 69 Stephan T., Zehnpfenning J., Benninghoven A. // *J. Vac. Sci. Technol.* 1994, A12, N2, p.405.
- 70 Vaeck L.V., Adriaens A., Gijbels R. // *Mass Spectrometry Reviews*, 1999, 18, p.1.
- 71 Сенников П.Г., Голубев С.В., Шашкин В.И., Прякин Д.И., Дроздов М.Н., Андреев Б.А., Дроздов Ю.Н., Кузнецов А.С., Поль Х.-Й. // *Письма в ЖЭТФ*, 2009, т.89, вып.2, с.80.
- 72 Shimizu Y., Takano A., Itoh K.M. // *Applied Surface Science*, 2008, v.255, p.1345.
- 73 Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов и др. // *Труды 14-го международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта 2010, Т. 1. С. 193.*
- 74 Website Carl Zeiss. <http://www.zeiss.de>

- 75 Katsuhiko Murakami. Development status of projection optics and illumination optics for EUV / Katsuhiko Murakami, Tetsuya Oshino, Hiroyuki Kondo et.al. //Proc. of SPIE. 2008. V. 6921, 69210Q.
- 76 Ключенков, Е.Б. Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью/ Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников и др.// Российские нанотехнологии. Т. 3, вып. 9-10. С. 79
- 77 Blunt, R. White light interferometry - a production worthy technique for measuring surface roughness on semiconductor wafers // SEMANTECH Conference, Vancouver, Canada, April 24-27, 2006. - P.59-62.
- 78 Асадчиков, В.Е. Метод рентгеновского рассеяния в изучении процесса полировки сверхгладких подложек / В.Е. Асадчиков, А.В. Виноградов, В.Н. Зрюев, И.В. Кожевников и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т. 67. - № 12 – С. 19-23.
- 79 Griffith, Joseph E. Dimensional metrology with scanning probe microscopes / Joseph E. Griffith, David A. Grigg // Journal of Applied Physics. - 1993. - V.74. - P.R83-R109.
- 80 Chkhalo, N.I. Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors / N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, E.P. Kruglyakov et.al. // Nucl. Ins. and Meth. in Phys. Res. A. - 1995. - V.359. - P.155-156.
- 81 Бибишкин, М.С. Определение микрошероховатости поверхностей с помощью мягкого рентгеновского излучения / М.С. Бибишкин, С.Ю. Зуев, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №1. - С.94-96.
- 82 Nevot, L. Characterisation des surfaces par reflection rasante de rayon Application a l'etude du polissage de quelque verres silicates / L. Nevot, P. Croce // Revue de Physique Appliquee. - 1980. - V.15. - P.761-779.
- 83 N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, N.N., Salashchenko and M.N. Toropov (2010). Manufacturing and Investigating Objective Lens for Ultrahigh Resolution Lithography Facilities, Lithography, Michael Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-064-3, INTECH, Available from:
- 84 <http://sciyo.com/articles/show/title/manufacturing-and-investigating-objective-lens-for-ultrahigh-resolution-lithography-facilities>.
- 85 Занавескин, М.Л. Атомно-силовая микроскопия в исследовании шероховатости наноструктурированных поверхностей // Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. – Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН – Москва. – 2008.

- 86 Asadchicov, V.E. Application of x-ray scattering technique to the study of supersmooth surfaces / V.E. Asadchicov, I.V. Kozhevnicov, Yu.S. Krivonosov, R. Mercier et.al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. – 2004. – V. 530.- P. 575-595.
- 87 Бирюков, А.В. АСМ и РРМ исследования шероховатостей поверхности стеклянных подложек с негауссовым распределением по высотам / А.В. Бирюков, С.В. Гапонов, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, В.Л. Миронов, Н.Н. Салашенко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. - №2, - С.17-20.
- 88 Занавескин, М.Л. Исследование шероховатости поверхности и методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света / Занавескин М.Л., Занавескина И.С., Рошин Б.С., Асадчиков В.Е., Азарова В.В., Грищенко Ю.В., Толстихина А.Л. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. - 2006. - № 3. - С. 80-82.
- 89 Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников и др. // Российские нанотехнологии, 2008, Т. 3. № 9-10. С.90.
- 90 N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, et al. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. 033107.
- 91 N.I. Chkhalo, E.B. Klueikov, A.E. Pestov, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V.603. 2009. Issues 1-2. 2009. P. 62-65.
- 92 Н.Н. Салашенко, А.С. Скрыль, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 14-го международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта 2010, Т. 2. С. 606.
- 93 Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Труды 13-го международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 16-20 марта 2009, т.1, с.