

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

«12»

12

2011 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
(ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ)

«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»

Государственный контракт №16.552.11.7007 от "29" апреля 2011г.
в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»,
мероприятие 5.2, шифр заявки «2011-5.2-552-001-005»

Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Научный руководитель,
зам. директора по НИР,
доктор физ.-мат. наук

подпись, дата

В. И. Шашкин

Нижний Новгород 2011

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



09.12.11

В. И. Шашкин (введение,
разделы 1,2,3,6 заключение)

подпись и дата

Исполнители темы

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


09.12.11
подпись и дата

Ю. Н. Дроздов (разделы
2,3,4,5)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.


09.12.11

Н.И. Чхало (раздел 6)

подпись и дата

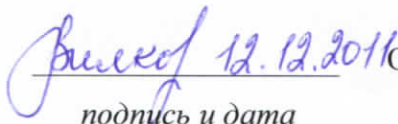
ведущий электроник,
к.ф.-м.н.


9.11.2011

В.Р. Закамов (раздел 1)

подпись и дата

Нач. отдела закупок
ИФМ РАН


12.12.2011
подпись и дата

О.В. Вилкова (раздел 2)

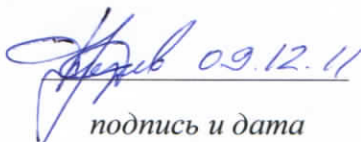
н.с., к.ф.-м.н.


09.12.11

П.В. Волков (раздел 1)

подпись и дата

с.н.с., к.ф.-м.н.


09.12.11
подпись и дата

М.Н. Дроздов (разделы 4,5)

Ученый секретарь ИФМ,
к.х.н.


12.12.11

Г.Л. Пахомов (раздел 3)

подпись и дата

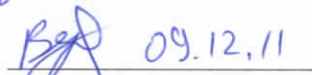
с.н.с., к.ф.-м.н.


09.12.11

А.Ю. Аладышкин (раздел 2)

подпись и дата

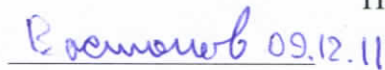
с.н.с., к.ф.-м.н.


09.12.11

С.Н. Вдовичев (раздел 2)

подпись и дата


н.с., к.ф.-м.н.


09.12.11

Н.В. Востоков (раздел 1)


подпись и дата

с.н.с., к.ф.-м.н.


9.12.11
подпись и дата


С.А. Гусев (раздел 2)

н.с., к.ф.-м.н.


12.12.11
подпись и дата


В.М. Данильцев (раздел 1)

с.н.с.


9.12.11
подпись и дата


Е.В. Демидов (раздел 1)

н.с., к.ф.-м.н.


9.12.11
подпись и дата


К.Е. Спиринов (разделы 2,3,4)

м.н.с.


9.12.11
подпись и дата

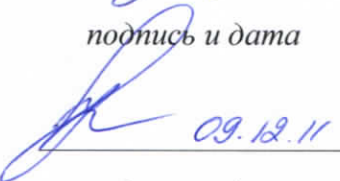
В.В. Травкин (раздел 4)

технолог


09.12.11
подпись и дата

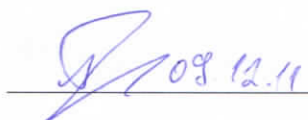
А.Н. Тропанова (раздел 4)

м.н.с.


09.12.11
подпись и дата

Д.В. Юрасов (раздел 4)

Инженер-исследователь


09.12.11
подпись и дата

П.А. Юнин (разделы 4,5)

Нормоконтролер


9.12.11
подпись и дата

А.В. Мурель

РЕФЕРАТ

Отчет 85 страниц, 8 таблиц, 34 рисунков, 27 источников, 5 приложений.

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).

Созданы новые методики исследования структур с δ -слоями и изготовленных на их основе низкобарьерных диодов (методика оценки параметров низкобарьерных диодов, основанная на обработке температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик и методика прямого определения глубины залегания расположенных близко к поверхности δ -слоев при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5). С их помощью выполнены экспериментальные исследования тестовых структур.

Разработана Программа развития ЦКП ИФМ РАН. Выполнены исследования в интересах сторонних организаций. Разработаны новые методики исследований и виды услуг, обновлен Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН. Закупленное в рамках темы спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию.

Выполнены разработки по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн и работы в области рентгеновской литографии. Предложена структурная схема и произведён выбор основных узлов быстродействующей цифровой системы регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов. Предложенная система является удобной для передачи, предварительной обработки, хранения и визуализации радиоизображений. В области рентгеновской литографии выполнены работы по отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм.

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1 Проведение экспериментальных исследований тестовых структур	10
1.1 Определение параметров структуры низкобарьерного диода с приповерхностным дельта-легированием из температурных зависимостей ВАХ	10
1.1.1 Введение	10
1.1.2 Теоретическая часть	12
1.1.3 Результаты и их обсуждение	13
1.1.4 Заключение	16
1.2 Послойный анализ структур с дельта-слоями методом ВИМС с учетом функции разрешения по глубине TOF.SIMS-5	16
1.2.1 Введение	16
1.2.2 MRI - модель	17
1.2.3 Результаты и их обсуждение	18
1.2.4 Заключение	24
2 Поставка спецоборудования и проведение пуско-наладочных работ	25
2.1 Формирование контрактов на поставку спецоборудования	25
2.2 Проведение пуско-наладочных работ и ввод в эксплуатацию вновь закупленного оборудования	26
2.2.1 Профилометр модели 130	27
2.2.2 Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000	32
3 Разработка Программы развития ЦКП ИФМ РАН	37
4 Проведение исследований в интересах сторонних организаций	39
4.1 Организация исследований в интересах сторонних организаций в ЦКП ИФМ РАН	39

4.2 Исследования в интересах сторонних организаций, выполненные в ЦКП ИФМ РАН	40
5 Разработка новых видов услуг и обновление Перечня услуг ЦКП ИФМ РАН	41
6 Исследование матричных детекторов системы радиовидения 3-мм диапазона длин волн и исследования в области рентгеновской литографии	42
6.1 Система регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов	42
6.1.1 Выбор микроконтроллера	47
6.1.2 Узел USB	49
6.1.3 Узел АЦП	49
6.1.4 Узел контроллера SPI	51
6.2 Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм	52
6.3 Система освещения маски ЭУФ нанолитографа	62
6.3.1 Введение	62
6.3.2 Описание системы освещения маски ЭУФ нанолитографа	63
6.3.3 Выводы	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71
Приложение А Программа развития ЦКП ИФМ РАН	74
Приложение Б Перечень организаций – заказчиков исследований	77
Приложение В Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»	79
Приложение Г Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»	81
Приложение Д Актуализированный перечень услуг ЦКП ИФМ РАН	84

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;
- ЭУФ – экстремальный ультрафиолет;
- АЦП - аналого-цифровой преобразователь;
- МК – микроконтроллер;
- БУ - буферный усилитель;
-

ВВЕДЕНИЕ

Основанием для проведения НИР является государственный контракт №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 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».

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 2 «Проведение теоретических и экспериментальных исследований» было предусмотрено выполнение следующих работ:

- Проведение экспериментальных исследований тестовых структур.
- Поставка спецоборудования и проведение пуско-наладочных работ.
- Разработка Программы развития ЦКП ИФМ РАН.
- Проведение исследований в интересах сторонних организаций.
- Разработка новых видов услуг и обновление Перечня услуг ЦКП ИФМ РАН.
- Исследование матричных детекторов системы радиовидения 3-мм диапазона длин волн и исследования в области рентгеновской литографии.

В настоящем отчете приведены результаты выполненных работ. В разделе 1 описаны новые методики исследования структур с δ -слоями и низкобарьерных диодов, изготовленных на их основе. С их помощью выполнены экспериментальные исследования тестовых структур. В частности, предложена методика оценки параметров низкобарьерных диодов, изготовленных методом приповерхностного дельта-легирования, основанная на обработке температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик. Методика базируется на специально разработанной теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник.

Полученные экспериментальные данные позволили уточнить ростовые параметры процессов для получения оптимальных, с точки зрения детекторных характеристик, микроволновых диодов, применяемых в матричных системах радиовидения.

Разработана методика прямого определения глубины залегания расположенных близко к поверхности тонких слоев (δ -слоев) при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5. С этой целью исследована функция разрешения по глубине TOF.SIMS-5 для нескольких типов анализируемых структур (δ -Si в GaAs - матрице и δ -Ge в Si – матрице) при различных параметрах эксперимента с учетом ионного перемешивания, наведенной шероховатости и информационной глубины. Экспериментально показано, что определение глубины залегания δ -слоя по положению пика непосредственно на экспериментальном профиле содержит большую систематическую погрешность, учет которой по предложенной методике значительно повышает точность определения положения δ -слоя.

Закупленное в рамках темы спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию (раздел 2).

Разработана Программа развития ЦКП ИФМ РАН (раздел 3).

Выполнение исследований в интересах сторонних организаций обсуждены в разделе 4.

Разработаны новые методики исследований и виды услуг, обновлен Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН (раздел 5).

За счет внебюджетных средств выполнены разработки по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн и работы в области рентгеновской литографии (раздел 6). Предложена структурная схема и произведен выбор основных узлов быстродействующей цифровой системы регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов. Предложенная система является удобной для передачи, предварительной обработки, хранения и визуализации радиоизображений. В области рентгеновской литографии выполнены работы по отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм.

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

1 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР

Определение параметров структуры низкобарьерного диода с приповерхностным дельта-легированием является сложной задачей. В подразделе 1.1 настоящего отчета предложена методика оценки параметров структуры низкобарьерных диодов, изготовленных на основе эффекта приповерхностного дельта-легирования, из обработки температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик. Это стало возможно благодаря разработанной для них теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник. Полученные данные позволили уточнить ростовые параметры процессов для получения оптимальных, с точки зрения детекторных характеристик, микроволновых диодов, применяемых в матричных системах радиовидения.

В подразделе 1.2 описано прямое определение глубины залегания расположенных близко к поверхности тонких слоев (δ -слоев) при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5. С этой целью исследована функция разрешения по глубине TOF.SIMS-5 для нескольких типов анализируемых структур при различных параметрах эксперимента. Реализован численный алгоритм расчета профиля распределения элемента по глубине для заданной модели структуры с учетом ионного перемешивания, наведенной шероховатости и информационной глубины. Методом подгонки вычисленных профилей под экспериментальные при варьировании параметров функции разрешения определялись значения глубин залегания расположенных близко к поверхности тонких слоев (δ -слоев) Si в GaAs - матрице и Ge в Si - матрице. Показано, что определение глубины залегания δ -слоя по положению пика непосредственно на экспериментальном профиле содержит большую систематическую погрешность, учет которой значительно повышает точность определения положения δ -слоя.

1.1 Определение параметров структуры низкобарьерного диода с приповерхностным дельта-легированием из температурных зависимостей ВАХ

1.1.1 Введение

Диод с барьером Шоттки является одним из основных чувствительных нелинейных элементов, используемых при приёме микроволнового излучения. Однако высота барьера в структурах металл-полупроводник (кремний, арсенид галлия) практически не зависит от

типа и метода нанесения металлов и составляет не менее 0.6 эВ. Соответственно, для вывода в рабочую точку такие детекторы требуют подачи напряжения смещения, что приводит к росту шумов и усложняет конструкцию многоэлементных матричных приёмников, необходимых в системах радиовидения. Выход находят в снижении высоты барьера для получения класса приборов, называемых “zero-bias detector diodes”, то есть детекторных диодов, не требующих для реализации высокой чувствительности подачи напряжения смещения. Разработано несколько технологических методов, которые тем или иным образом нейтрализуют или компенсируют влияние заряженных поверхностных состояний на границе металл-полупроводник [1,2], определяющих высокие значения высоты барьера, или модифицируют механизм прохождения тока через барьер [3]. Также описаны попытки использования с этой целью различных гетероструктур [4-6].

Нами реализованы низкобарьерные арсенид-галлиевые диоды на основе барьеров Шоттки с приповерхностным изотипным δ -легированием [7], которые при простой технологии изготовления обеспечивают высокую чувствительность при детектировании микроволновых сигналов без постоянного смещения [8]. Показано, что они являются перспективными для создания планарных матричных приёмных систем радиовидения в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн [9].

Важным этапом исследований является оптимизация характеристик детекторов на основе модели электронного транспорта, которая подробно описана в работе [10]. В этих работах предполагалось, что параметры структуры диода (толщины слоёв и уровни легирования) с достаточной степенью точности известны из измерений на контрольных образцах с применением аналитических и электрофизических методов. Экспериментально было показано, что коэффициент нелинейности диода $\alpha = \frac{\partial^2 I / \partial V^2}{\partial I / \partial V}$, определяющий чувствительность детектора, максимален вблизи нулевого смещения для диодов с эффективной высотой барьера ~ 0.3 эВ. К такому же выводу мы пришли [8] при исследовании изготовленных микроволновых детекторов при работе на частоте 94 ГГц. Оптимальными характеристиками по вольт-ваттной чувствительности при нулевом смещении обладали диоды с высотой барьера 0.25-0.35 эВ.

Однако из-за существующей в эпитаксиальной технологии неоднородности параметров по площади (без принятия специальных мер) и экспоненциальной зависимости туннельного тока от глубины залегания дельта-слоя наблюдается значительный разброс по характеристикам изготовленных диодов. Расчет показывает, что при изменении глубины залегания дельта-слоя на ± 1 монослой арсенида галлия ($\sim 3\text{\AA}$) эффективная высота барьера меняется на $\sim -14/+25$ мэВ, что для низкобарьерных диодов

составляет ~10%. Эта проблема является характерной для приборов, содержащих туннельные барьеры [11].

Диагностика параметров самой диодной структуры из-за очень близкого (3-5 нм) расположения дельта-слоя к границе металл-полупроводник является сложной задачей и до настоящего времени практически не решена. По этой причине представляет интерес решение обратной задачи, когда имеется изготовленный диод и требуется определить его основные внутренние параметры (глубину залегания d_0 и слоевую концентрацию доноров N^{2D} в δ -слое). Задача осложняется тем, что эффект снижения высоты барьера в первом приближении (при условии доминирующей роли туннелирования) определяется произведением этих параметров. Поэтому для их независимого определения необходима дополнительная информация, в качестве которой мы использовали температуру. Как было показано [12], для определения параметров низкобарьерных диодов (НБД) удобно использовать зависимости дифференциального сопротивления диода от напряжения $R_d(V)$, которые имеют более выраженный (по сравнению с токовыми зависимостями) участок с экспоненциальной зависимостью при малых напряжениях смещения. Поэтому в данной работе нами анализировался экспериментальный массив данных R_d - V - T .

1.1.2 Теоретическая часть

Согласно теории токопереноса низкобарьерного диода на основе диода Мотта с приповерхностным изотипным δ -легированием [10], ВАХ можно описать следующим уравнением:

$$J(V) = A^* \cdot T^2 \cdot e^{-b(V)} \cdot e^{-\Delta_0/kT} \cdot \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (1.1)$$

- где Δ_0 – величина потенциального барьера в плоскости δ -слоя, определяющего термоэлектронную эмиссию носителей через границу металл-полупроводник; $b(V)$ – фактор, учитывающий конечную вероятность туннелирования носителей через треугольную вершину барьера. Эти величины напрямую зависят от ростовых параметров структуры низкобарьерного диода.

Из (1.1) можно вычислить дифференциальное сопротивление диода при нулевом смещении $R_d(0)$:

$$R_d(0) = \frac{k}{qA^*T} \cdot e^{b_0} \cdot e^{\Delta_0/kT} \quad (1.2)$$

Отсюда следует, что построив экспериментально полученные значения $R_d(0) \cdot T$ в координатах Аррениуса, мы можем оценить величины Δ_0 и b_0 . Знание этих двух величин

позволяет сделать в первом приближении оценку параметров δ -слоя d_0 и N^{2D} по нижеприведённым формулам [10]:

$$d_0 = \frac{b_0}{\frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{2me}}{\hbar} \cdot \sqrt{q \cdot (\Phi - \Delta_0)}} \quad (1.3)$$

$$N^{2D} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\Phi - \Delta_0)}{q \cdot d_0} \quad (1.4)$$

1.1.3 Результаты и их обсуждение

Исследования были проведены для трёх микроволновых детекторных диодах (площадь анода $\sim 8 \text{ мкм}^2$), параметры которых приведены в таблице 1.1. Эффективная высота барьера φ^{eff} рассчитывалась из ВАХ при комнатной температуре (рис. 1.1,а) по методике [12], и составляла 0.28; 0.37 и 0.53 эВ, при этом их дифференциальное сопротивление при нулевом смещении изменяется более чем на 4 порядка (рис. 1.1, б).

Таблица 1.1 - Параметры микроволновых низкобарьерных диодов

№	φ^{eff} , эВ	n	R_d (0 В)
E722 (1)	0.28	1.77	10 кОм
E722 (2)	0.37	1.6	1 МОм
E793 (4)	0.53	1.5	500 МОм

Температурные измерения ВАХ проводились в диапазоне 120-340 К, на основании которых строились зависимости R_d-V-T . На рис. 1.2 приведены зависимости Аррениуса $\log(R_d T) = f(1/T)$, где значения дифференциального сопротивления брались при нулевом напряжении смещения. Из этих зависимостей были сделаны оценки энергии активации, определяемой из угла наклона и равной величине Δ_0 , и значения b_0 , вычисленные из точки пересечения прямых с осью при значении $1/T$, стремящемся к нулю.

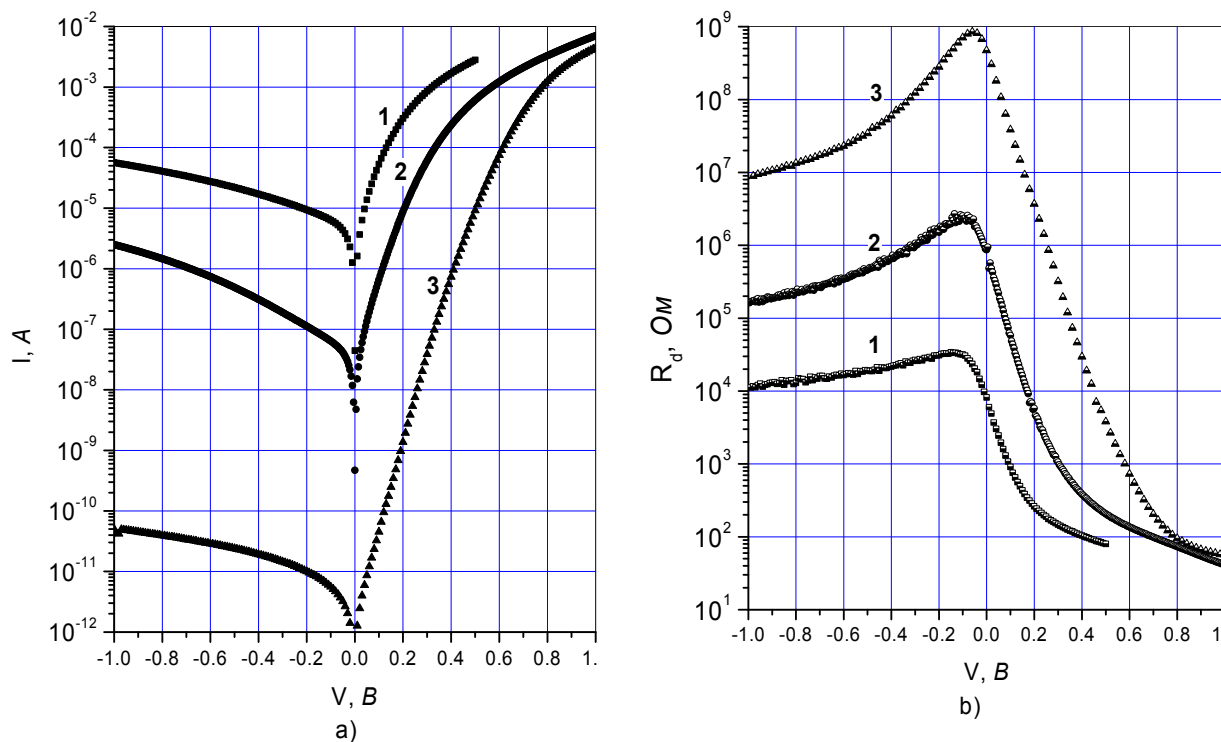


Рисунок 1.1 - Зависимости тока (а) и дифференциального сопротивления (b) от приложенного напряжения смещения для исследуемых низкобарьерных диодов: 1 - E722(1); 2 - E722(2); 3 - E793(4)

Экспериментально определённые из рис. 1.2 величины, входящие в формулу (1.1), представлены в табл. 1.2. Полная эффективная высота барьера, согласно (1.1), будет состоять из двух слагаемых: $\phi_b = \Delta_0 + b_0 kT$. Как видно, величины барьеров, определённые двумя методами, достаточно хорошо согласуются, что свидетельствует о достоверности используемой модели [10], предложенной для описания работы низкобарьерного диода такого типа.

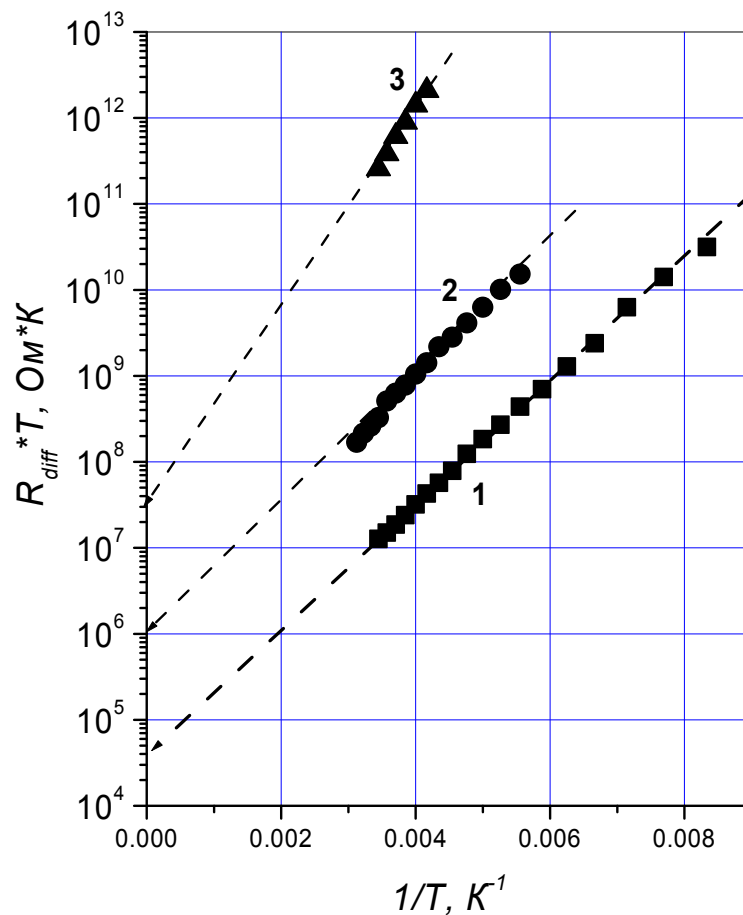


Рисунок 1.2 Зависимости $R_d T$, взятые при нулевом смещении, в координатах Аррениуса для исследуемых диодов (обозначения как на рис. 1.1)

Знание двух величин Δ_0 и b_0 позволяет сделать в первом приближении оценку параметров δ -слоя d_0 и N^{2D} , значения которых приведены в табл. 1.3, по вышеприведённым формулам (1.3) и (1.4).

Таблица 1.2 - Модельные параметры ВАХ диодов, извлечённые из температурных зависимостей

№	Δ_0 , эВ	b_0	$b_0 kT$, эВ	$\varphi_b = \Delta_0 + b_0 kT$, эВ (I-V-T)	φ_b , эВ I-V (300K)
E722(1)	0.14	6.01	0.15	0.29	0.28
E722(2)	0.15	8.6	0.23	0.38	0.37
E793(4)	0.25	11.6	0.29	0.54	0.53

Как и можно было предположить, самый низкобарьерный диод E722(1) имеет наибольшую плотность легирования дельта-слоя, который расположен достаточно близко к границе с металлом, чем обеспечивается высокая туннельная прозрачность барьера.

Заглубление δ -слоя должно было бы приводить к уменьшению эффективной высоты барьера, однако это происходит до некоторой глубины, после которой начинает сказываться действие второго фактора – уменьшение туннельной компоненты тока из-за роста толщины d_0 , что наглядно иллюстрируют два других диода. Таким образом, разумным подбором этих двух параметров можно в широких пределах прецизионно регулировать эффективную высоту барьера Шоттки для получения оптимальных характеристик низкобарьерных диодов.

Таблица 1.3 - Рассчитанные параметры структуры низкобарьерного диода с приповерхностным дельта-легированием

$N_2 N_0$	$d_0, \text{ нм}$	$N^{2D} \times 10^{-12}, \text{ см}^{-2}$
E722 (1)	4.7	8.4
E722 (2)	6.4	6.5
E793 (4)	9.5	3.7

1.1.4 Заключение

Предложена методика оценки параметров структуры низкобарьерных диодов, изготовленных на основе эффекта приповерхностного дельта-легирования, из обработки температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик. Это возможно благодаря разработанной для них теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник. Полученные данные позволили уточнить ростовые параметры процессов для получения оптимальных, с точки зрения детекторных характеристик, микроволновых диодов, применяемых в матричных системах радиовидения.

1.2 Послойный анализ структур с дельта-слоями методом ВИМС с учетом функции разрешения по глубине TOF.SIMS-5

1.2.1 Введение

Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) широко используется для элементного анализа по глубине полупроводниковых гетероструктур. Искажение экспериментальных профилей по сравнению с реальным распределением элементов описывается некоторой функцией разрешения по глубине [13]. Когда функция разрешения по глубине известна, появляется принципиальная возможность приблизить профиль к истинному, и тем самым значительно повысить информативность метода. Целью работы был анализ параметров функции разрешения прибора TOF.SIMS-5 и решение задачи нахождения глубины

залегания близко расположенных к поверхности δ -слоев из экспериментального профиля ВИМС.

1.2.2 MRI - модель

Послойный анализ методом ВИМС включает в себя послойное ионное распыление образца и анализ эмитированных с поверхности вторичных ионов. До сих пор нет общей теории, объясняющей все процессы, происходящие при распылении ионами низких энергий, поэтому для количественного и качественного описания наблюдаемых явлений используются упрощенные модели. Одна из них – MRI (*mixing – roughness – information depth*) модель Хофмана [13]. В рамках этой модели процессы ионного распыления описываются тремя основными вкладами – однородным перемешиванием атомов в приповерхностном слое, развитием шероховатости поверхности и информационной глубиной выхода вторичных ионов.

Обычно экспериментально измеряемый профиль математически можно представить как интеграл свертки истинного профиля с функцией разрешения прибора:

$$I(z)/I_0 = \int g(z - z_0) X(z_0) dz_0, \quad (1.5)$$

где $I(z)/I_0$ – нормированный экспериментальный профиль распределения концентрации элемента по глубине, $X(z_0)$ – истинный профиль, $g(z - z_0)$ – функция разрешения по глубине. Экспериментально функция разрешения может быть измерена как профиль образца с δ -слоем [13].

Согласно MRI модели, функция разрешения по глубине может быть представлена в виде совокупности трех соответствующих вкладов:

$$\begin{aligned} g(L_m) &= \exp(- (z - z_0 + L_m) / L_m) \\ g(\sigma) &= 1/(\sigma (2\pi)^{1/2}) \exp(- (z - z_0)^2 / 2\sigma) \\ g(\lambda) &= \exp(- (z - z_0) / \lambda), \end{aligned} \quad (1.6)$$

где z_0 – положение δ -слоя, L_m – толщина зоны перемешивания, σ – шероховатость, λ – информационная глубина. Параметры функции разрешения по глубине зависят как от типа исследуемой структуры, так и от режима ионного распыления.

Для послойного анализа существуют прямая и обратная задачи – расчет профиля по заданной модели структуры, и восстановление истинного распределения элементов по глубине по имеющемуся экспериментальному профилю. На данном этапе работы был реализован численный алгоритм для решения прямой задачи в рамках MRI модели. При решении прямой задачи могут быть использованы два подхода – непосредственное моделирование процесса и свертка истинного профиля с соответствующими функциями (1.6). В последнем случае возникает необходимость аналитического продолжения

истинного профиля, так как интеграл свертки берется от $-\infty$ до $+\infty$. Выполненное нами сравнение результатов расчета с использованием обоих подходов показало их хорошее согласование, что может служить подтверждением корректности расчетных алгоритмов.

1.2.3 Результаты и их обсуждение

Экспериментальные профили получены с использованием прибора TOF.SIMS-5, распыляющие ионы - Cs^+ , анализирующий пучок - Bi^+ [14]. Калибровка скорости распыления проводилась путем измерения глубины кратеров на оптической измерительной системе Talysurf CCI 2000. На рис. 1.3 представлены смоделированный (линия) и полученный в эксперименте (точки) профили распределения концентрации кремния по глубине в образце E1224 с δ -слоем Si в матрице GaAs. Поскольку слой тонкий, то, согласно (1.5), профиль будет представлять собой функцию разрешения по глубине, соответствующую некоторым значениям параметров L_m , σ , λ . Вид переднего края профиля определяется в основном информационной глубиной и шероховатостью, в то время как вид спадающего края зависит от значения глубины перемешивания. Видно, что максимум сигнала смещен к поверхности по сравнению с истинным положением слоя. Этот эффект связан с атомным перемешиванием. Перейдем к рассмотрению количественных зависимостей параметров MRI модели от условий эксперимента.

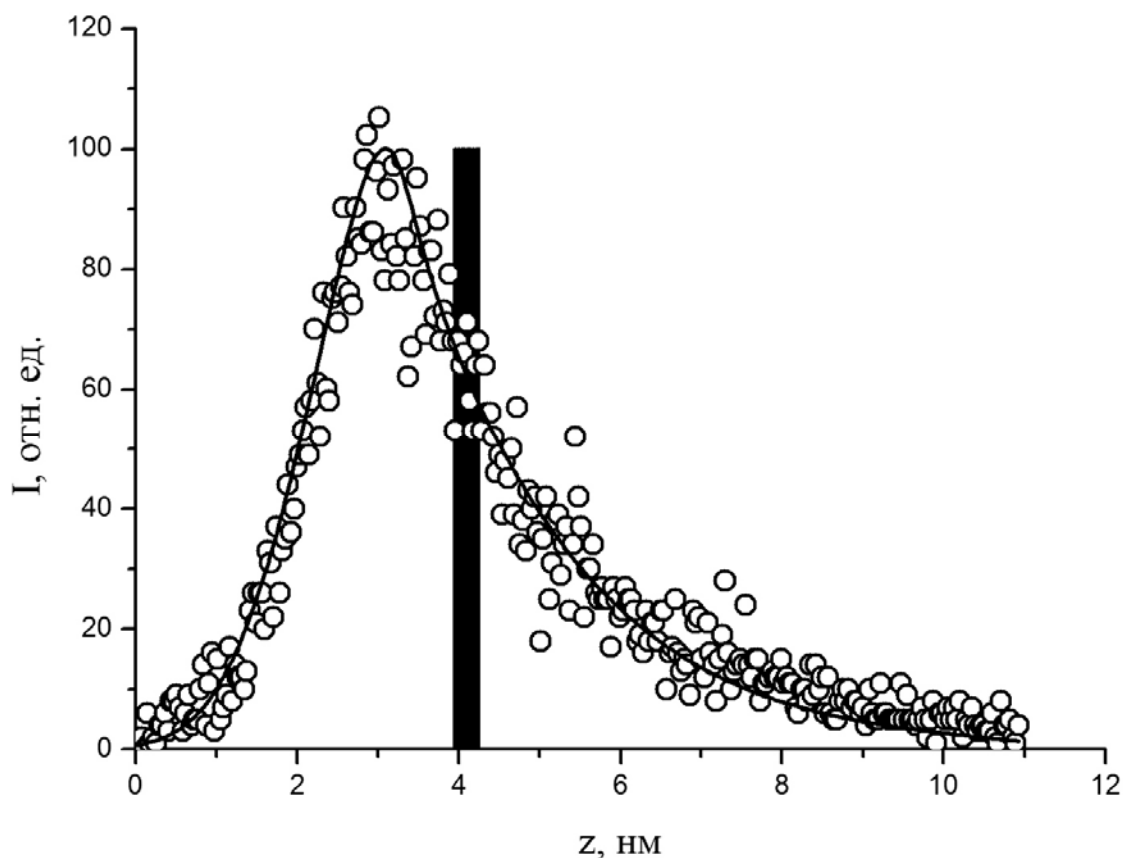


Рисунок 1.3 Экспериментальный (точки) и вычисленный (линия) профили концентрации атомов кремния для структуры E1224. Столбик – положение δ -слоя при моделировании.

На рис. 1.4 приведены экспериментально полученные профили распределения Ge по глубине для структуры R122 с тремя δ -слоями Ge в Si. Профили получены при различной энергии распыляющих ионов Cs^+ , $E = 0,5; 1$ и 2 кэВ. Параметры анализирующего пучка Vi^+ не менялись. Согласно модели MRI, увеличение энергии распыляющих ионов должно приводить к увеличению зоны перемешивания, что и наблюдается в экспериментальных профилях. Вид переднего края профилей остается почти неизменным, в то время как спадающие хвосты профилей заметно удлиняются с ростом энергии распыляющих ионов. Увеличивается также смещение максимумов сигнала относительно истинного положения δ -слоев. Для определения численных значений параметров L_m , σ и λ в случае различных режимов послойного анализа использован метод подгонки рассчитанных профилей под экспериментальные при варьировании параметров модели. Рисунки 1.3 и 1.4 показывают, что рассчитанные профили достаточно хорошо описывают эксперимент.

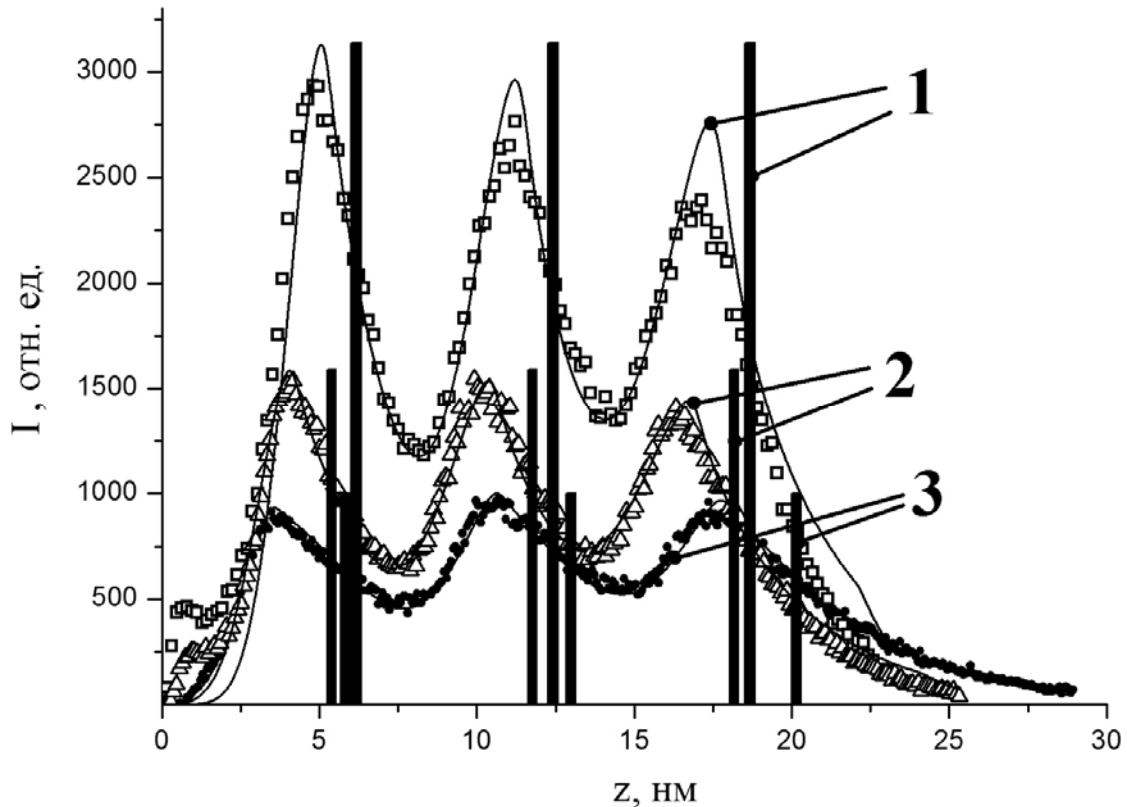


Рисунок 1.4 Подгонка рассчитанных профилей под экспериментальные для структуры R122. Точки – эксперимент. 1 – $E = 0,5$ кэВ; 2 – $E = 1$ кэВ; 3 – $E = 2$ кэВ. Линии – рассчитанные профили. Столбики – положения δ -слоев при моделировании (1, 2 и 3 различаются по высоте).

Численные значения параметров модели, полученные в результате подгонки для образца R122, приведены в таблице 1.4. Видно, что глубина перемешивания увеличивается с ростом энергии распыляющих ионов. В литературе [15] приводится следующая

эмпирическая формула для связи глубины перемешивания с энергией распыляющих ионов Cs^+ :

$$L_m = 1,838 \cdot E^{0,68} \cdot \cos\theta, \quad (1.7)$$

где E – энергия распыляющих ионов в килоэлектронвольтах, θ – угол падения ионов на поверхность образца, L_m – глубина перемешивания, выраженная в нанометрах. Приведенные в таблице 1 значения L_m для образца R122 достаточно хорошо описываются формулой (1.7), поэтому в дальнейшем она использовалась для предварительной оценки глубины перемешивания.

При моделировании считалось, что шероховатость развивается с глубиной из-за статистического характера процесса распыления и описывается выражением $(a+b \cdot z^{1/2})$. Её развитие зависит от образца, энергии распыляющих ионов и размеров кратера травления, поэтому параметры a и b варьировались. Из таблицы видно, что $b \neq 0$. В то же время, прямые измерения шероховатости поверхности на интерферометре Talysurf CCI 2000 до и после травления образца не показали различия. Этот результат может быть связан либо с неадекватностью модели, либо с малой чувствительностью интерферометра к микрошероховатости, так как размер пикселя изображения (1 мкм^2) много больше характерных размеров нарушения планарности поверхности. Информационная глубина выхода вторичных ионов слабо зависит от режимов анализирующего пучка, и при моделировании полагалась равной $\sim 0,3 \text{ нм}$ для всех экспериментов.

Таблица 1.4 Условия эксперимента и параметры модели для различных режимов анализа образца R122

Распыляющие ионы	Размер кратера травления, мкм^2	L_m , нм	σ , нм
Cs^+ 500 эВ	150x150	1,1	$0,5+1,2 \cdot z^{1/2}$
Cs^+ 1 кэВ	300x300	1,3	$0,6+1,2 \cdot z^{1/2}$
Cs^+ 2 кэВ	500x500	2,3	$0,6+z^{1/2}$

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что MRI модель Хофмана достаточно хорошо описывает экспериментальное искажение профилей и может быть применена для исследования структур с δ -слоями. Положение слоя, определенное с помощью подгонки, значительно отличается от определяемого по максимуму на профиле ВИМС. Моделирование позволяет найти поправку к положению слоя и учесть систематическую погрешность, связанную с искажением профиля при послойном анализе.

Обобщенно результаты можно представить в виде графика поправок в зависимости от шероховатости при нескольких значениях глубины перемешивания, рис. 1.5. Для построения графика задавались структуры с одним δ -слоем, и по MRI модели рассчитывались профили при различных параметрах L_m и σ . Выбранные значения глубины перемешивания соответствуют энергиям распыляющих ионов Cs^+ , часто использующимся в TOF.SIMS-5. По рассчитанным профилям определялся сдвиг максимума сигнала относительно истинного положения δ -слоя.

В таблице 1.5 приведены положения δ -слоев в структуре R122, определяемые без учета и с учетом поправок при различных режимах ионного травления. Видно, что учет поправок существенно изменяет среднее значение положения δ -слоя, определяемое при трех различных энергиях распыляющих ионов и позволяет исключить соответствующую систематическую погрешность. Однако наблюдается увеличение разброса значений положения δ -слоя, полученных в разных экспериментах, для глубоко залегающих δ -слоев. Если для первого слоя, лежащего близко к поверхности, учет поправок уменьшает случайную погрешность определения его положения, то для более глубоко залегающих

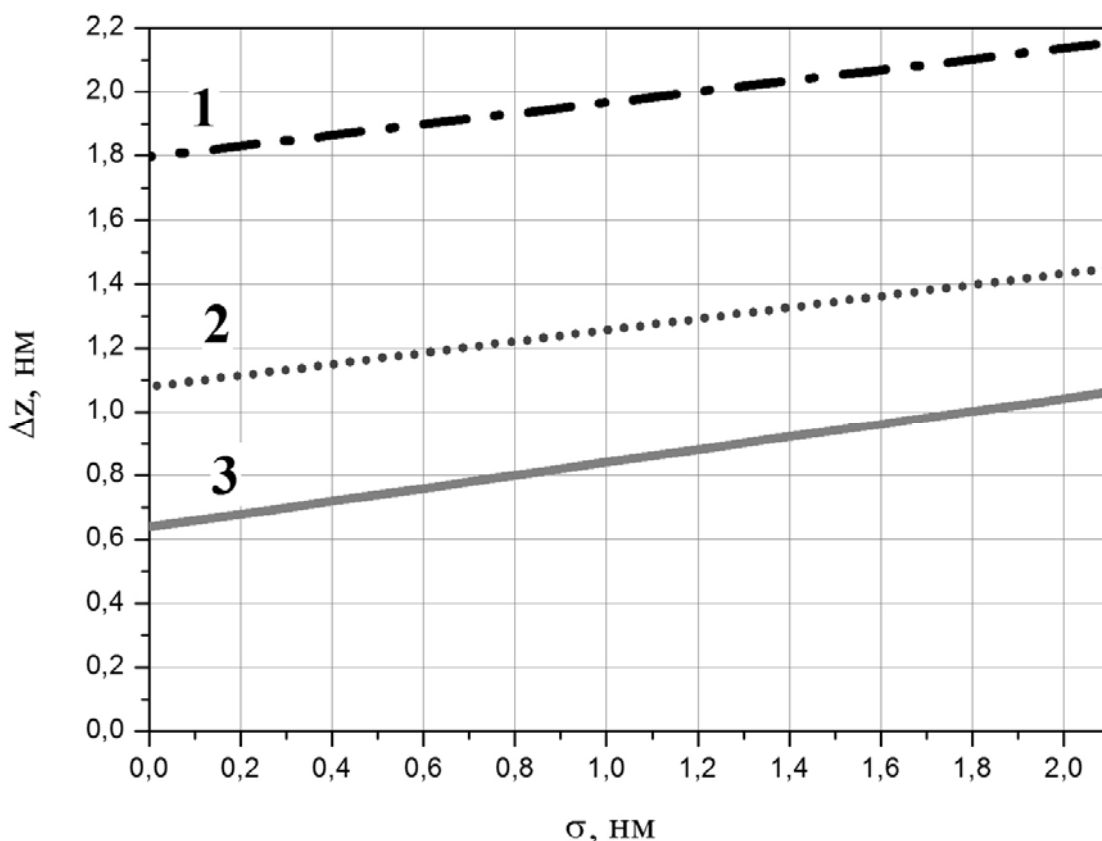


Рисунок 1.5 График поправок к глубине залегания δ -слоя для трех значений энергии распыляющих ионов в зависимости от поверхностной шероховатости. 1 – $E = 2$ кэВ; 2 – $E = 1$ кэВ; 3 – $E = 0,5$ кэВ

слоев учет поправок исключает только систематическую погрешность определения глубины залегания, не уменьшая случайной. Видимо, при длительном распылении становятся существенными эффекты, не учитываемые в использованной модели. В данном случае учет поправок оказывается более корректным для δ -слоев, лежащих близко к поверхности.

Аналогичное исследование с изменением режимов анализа выполнено для структуры E1209 с залегающим вблизи поверхности одиночным δ -слоем Si в GaAs. Послойный анализ образца проводился при пяти различных режимах распыления с вариацией энергии распыляющих ионов и размера кратера травления. Полученные при этом значения глубины залегания δ -слоя без учета и с учетом соответствующего графика поправок схематично показаны на рис. 1.6. Стрелкой показано смещение величины в результате поправки. Учет поправок в этом случае приводит как к значительному изменению среднего значения глубины залегания слоя, так и к уменьшению среднеквадратичного отклонения результатов, полученных при различных энергиях и размерах кратеров, относительно среднего значения. Тем не менее, видно, что учет поправок не выводит все

Таблица 1.5 Глубина залегания δ -слоев в структуре R122, определенная с учетом и без учета поправок при различных параметрах экспериментов

Режим распыления: энергия Cs ⁺ и размер кратера	Положение слоя 1, нм		Положение слоя 2, нм		Положение слоя 3, нм	
	без поправок	с учетом поправок	без поправок	с учетом поправок	без поправок	с учетом поправок
0,5 кэВ, 150x150 мкм ²	4,8	5,7	11,2	12,2	17,1	18,2
1 кэВ, 300x300 мкм ²	4,2	5,5	9,9	11,3	16,3	17,8
2кэВ 500x500 мкм ²	3,5	5,5	10,7	12,8	17,4	19,5
среднее значение	4,2	5,6	10,6	12,1	16,9	18,5
стандартное отклонение	0,5	0,1	0,5	0,6	0,5	0,7

величины глубин залегания на одинаковое значение. Результаты, полученные при разных энергиях распыляющих ионов, заметно различаются. В то же время, ввод поправок для результатов, полученных при одинаковой энергии распыляющих ионов, но разных размерах кратера травления, приводит к сдвигу значений глубины залегания на один и тот

же уровень, что в идеальном случае должно происходить для всех результатов. Уменьшение размера кратера приводило к возрастанию плотности потока ионов травления, что может повышать наведенную шероховатость дна. Параметр шероховатости вводился для каждого профиля индивидуально при подгонке вычисленного профиля к экспериментальному. Полученный результат может означать, что учет влияния шероховатости проводится корректно, а расхождение вызвано неточными значениями глубины перемешивания. Возможно также, что сказываются ограничения используемой модели. Этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании.

Таким образом для δ -слоев, залегающих близко к поверхности, учет поправок позволяет существенно повысить точность определения глубины залегания слоя. В частности, этот результат оказался важным при определении глубины залегания близко расположенных к поверхности δ -слоев Si в GaAs. Структуры этого типа используются для изготовления низкобарьерных диодов Шоттки [16], где глубина залегания δ -слоя является одним из важных параметров.

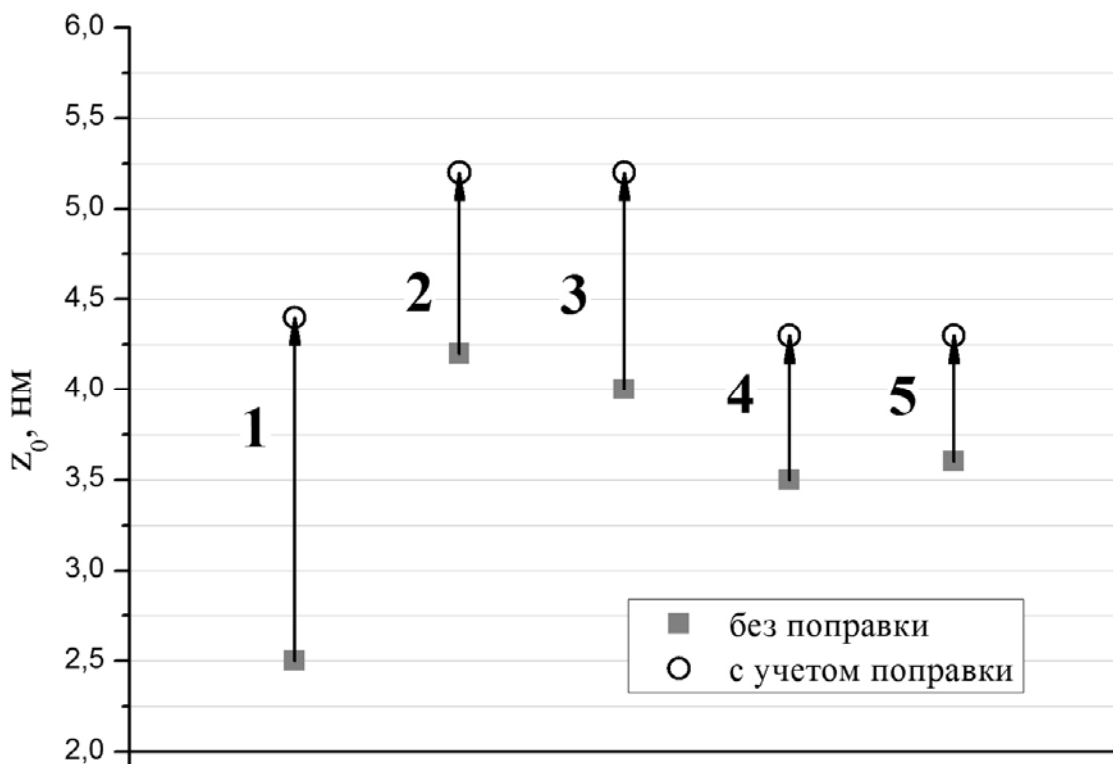


Рисунок 1.6 Глубины залегания δ -слоев в структуре E1209 без учета и с учетом поправок при пяти различных режимах распыления ионами Cs^+ . 1 – 2 кэВ, кратер 300x300 мкм²; 2 – 1 кэВ, кратер 300x300 мкм²; 3 – 1 кэВ, кратер 500x500 мкм²; 4 – 0,5 кэВ, кратер 250x250 мкм²; 5 – 0,5 кэВ, кратер 500x500 мкм².

1.2.4 Заключение

В рамках данной работы был реализован численный алгоритм решения прямой задачи – расчет профиля ВИМС по заданной модели структуры с учетом атомного перемешивания, наведенной шероховатости и информационной глубины. Методом подгонки рассчитанных профилей под экспериментальные определялись параметры MRI-модели для различных типов структур и режимов послойного анализа.

Предложен график поправок к значениям глубины δ -слоя, определяемым по максимуму интенсивности выхода вторичных ионов на профиле ВИМС. Показано, что учет поправок позволяет существенно повысить точность определения положения δ -слоев, залегающих близко к поверхности.

Метод применен для уточнения глубины залегания расположенных близко к поверхности δ -слоев Si в GaAs – структурах, использующихся для изготовления низкобарьерных диодов Шоттки.

2 ПОСТАВКА СПЕЦОБОРУДОВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

2.1 Формирование контрактов на поставку спецоборудования

На предыдущем этапе работы в системе электронных торгов были размещены заявки: 2 июня 2011 (Конкурс №22), 3 июня (Аукцион №24), 8 июня (Аукцион №25) и 10 июня (Аукцион №19). По результатам аукционов были заключены контракты с поставщиками: №24/140 от 18.07.2011 на поставку рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discovery на сумму 21.7 млн. руб.; №19/140 от 18.07.2011 на поставку лазерного генератора микро-изображений µPG101 на сумму 9.8 млн. руб.; №25/140 от 12.07.2011 на поставку источника бесперебойного питания Smart-UPS VT 30kVA на сумму 0.46 млн. руб.; №22/140 от 18.07.2011 на поставку высоковакуумной установки СММ-2000 на сумму 18.6 млн. руб. (в том числе, часть 1, поставка 2011 года - 9.5 млн. руб.). Оплачено полученное и установленное оборудование: высоковакуумная установка СММ-2000, часть 1,; источник бесперебойного питания Smart-UPS VT 30kVA. Копии накладных были приложены к отчету по этапу 1 настоящего контракта. На этапе 2 получено и оплачено оборудование: рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discovery на сумму 21.7 млн. руб.; лазерный генератора микро-изображений µPG101 на сумму 9.8 млн. руб.

В Таблице 2.1 отражены выполненные работы по закупке спецоборудования с указанием сроков поставки.

Таблица 2.1 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 (выполнено 5 декабря)
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 (выполнено)

	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.	02.06.2011 Конкурс №22	22/140 от 18.07.2011	СММ-2000. 18.6 (9.5 часть 1 2011 год)	август 2011 (выполнено)

2.2 Проведение пуско-наладочных работ и ввод в эксплуатацию вновь закупленного оборудования

Полученное спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию. Позиции №1 и №2 не описаны, поскольку на момент представления отчета их ввод в эксплуатацию не завершен. Источник бесперебойного питания Smart-UPS VT 30kVA использован для обеспечения бесперебойного питания в аварийных ситуациях для нового просвечивающего электронного микроскопа LIBRA 200MC (Carl Zeiss NTS GmbH, Germany, 2010 г.). Приборы, поставленные в 2011 году в комплекте I части установки СММ-2000 (профилометр модели 130 и микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000), предназначены для внеплазменного контроля поверхностей в установке СММ-2000, и рассматриваются нами как отдельные измерительные приборы. Для каждого из них выполнены пуско-наладочные работы и ввод в эксплуатацию. Особенно важны эти приборы для ЦКП ИФМ РАН своей метрологической обеспеченностью, поскольку внесены в Реестр измерительных средств России и имеют Акты метрологической поверки.

В последующих пунктах более подробно описаны особенности этих приборов с точки зрения их использования для выполнения измерений в ЦКП.

2.2.1 Профилометр модели 130

Профилометр модели 130 предназначен для измерений параметров профиля и параметров шероховатости поверхности по системе средней линии (ГОСТ 25142-82), с разделением «волнистости» и «шероховатости» по ГОСТ 2789-73. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерения, регистрационный № 33319-06. Область применения – метрологические центры, лаборатории научно-исследовательских и учебных институтов, лаборатории и центры экспертизы и контроля, предприятия машиностроительной, автомобильной, подшипниковой и других отраслей промышленности.

Профилометр состоит из индуктивного датчика с иглой и опорой на измеряемую поверхность, закрепляемого в электромеханическом приводе, с помощью которого он перемещается по горизонтальной измеряемой поверхности. В вертикальном направлении, для обеспечения контакта датчика с измеряемой деталью, привод с датчиком перемещается по колонне, установленной на плите, на которой базируется измеряемая деталь (рисунок 2.1). Действие профилометра основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом (алмазной иглой) в процессе перемещения вдоль измеряемой поверхности и последующего преобразования возникающих при этом вертикальных перемещений щупа в цифровой сигнал. Щуп встроен в блок датчика, который при сканировании ползет по поверхности образца своей опорой. Поэтому измерение профиля идет относительно опоры, представляющей собой твердосплавный полированный сегмент диска, неподвижно закрепленный на датчике.

В ЦКП ИФМ РАН прибор будет использоваться в комплекте с оптической измерительной системой Talysurf CCI 2000, где измерения высот точек поверхности выполняются по интерференционной картине. Измерения на Talysurf CCI 2000 становятся некорректными в случае прозрачных покрытий, когда отражение от внутренних границ сильнее, чем от границы с воздухом. Контактный профилометр модели 130 дает в этих случаях возможность измерить высоту ступенек на поверхности. В качестве примера выполненных измерений на рисунке 2.2 приведен результат промера на профилометре модели 130 тестового образца из комплекта Talysurf CCI 2000. В рабочем окне программы управления и обработки профиля видно, что глубина канавок 5018 нм измеряется достаточно точно.

Кроме того, надежность прибора позволяет использовать его персоналу с невысокой квалификацией. С учетом этой особенности начата подготовка лабораторной работы для студентов ННГУ им. Н.И. Лобачевского по измерению параметров шероховатости с использованием профилометра модели 130.

Прибор внесен в Государственный реестр средств измерения, регистрационный № 33319-06, см. копию сертификата на рисунке 2.3. Перед поставкой прибор прошел первичную метрологическую поверку со сроком действия до 17.08.2013 года, см. Акт поверки на рисунке 2.4.

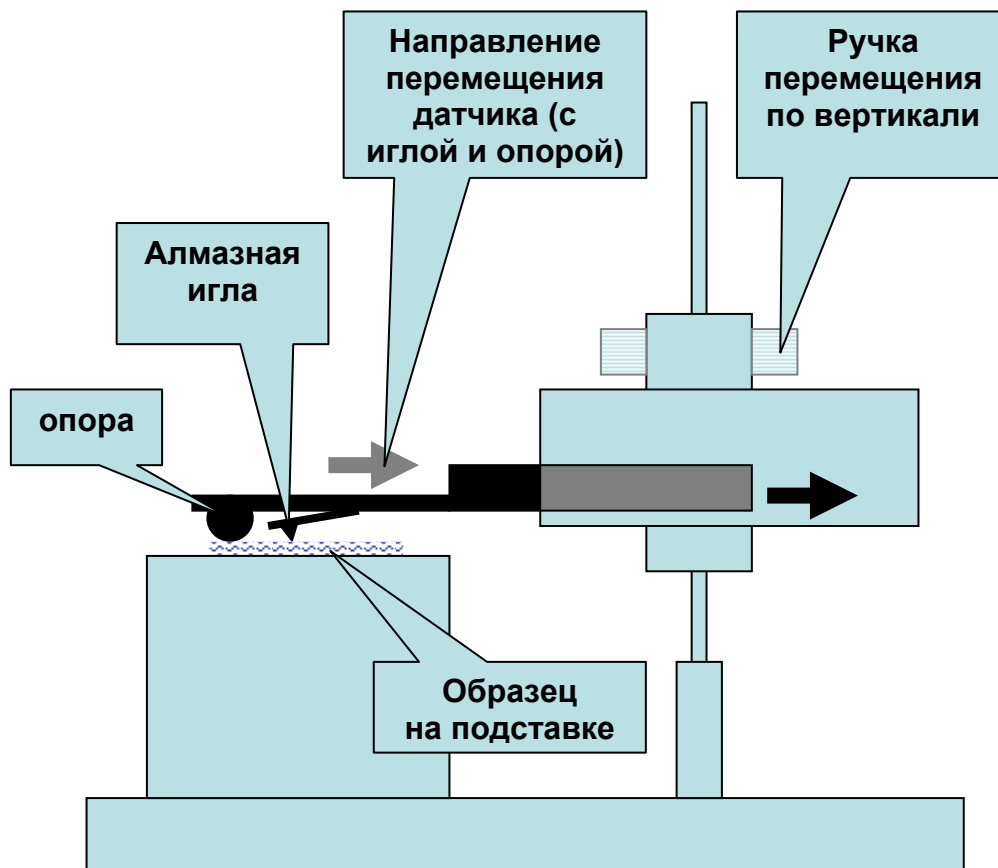


Рисунок 2.1 Принципиальная схема профилометра модели 130

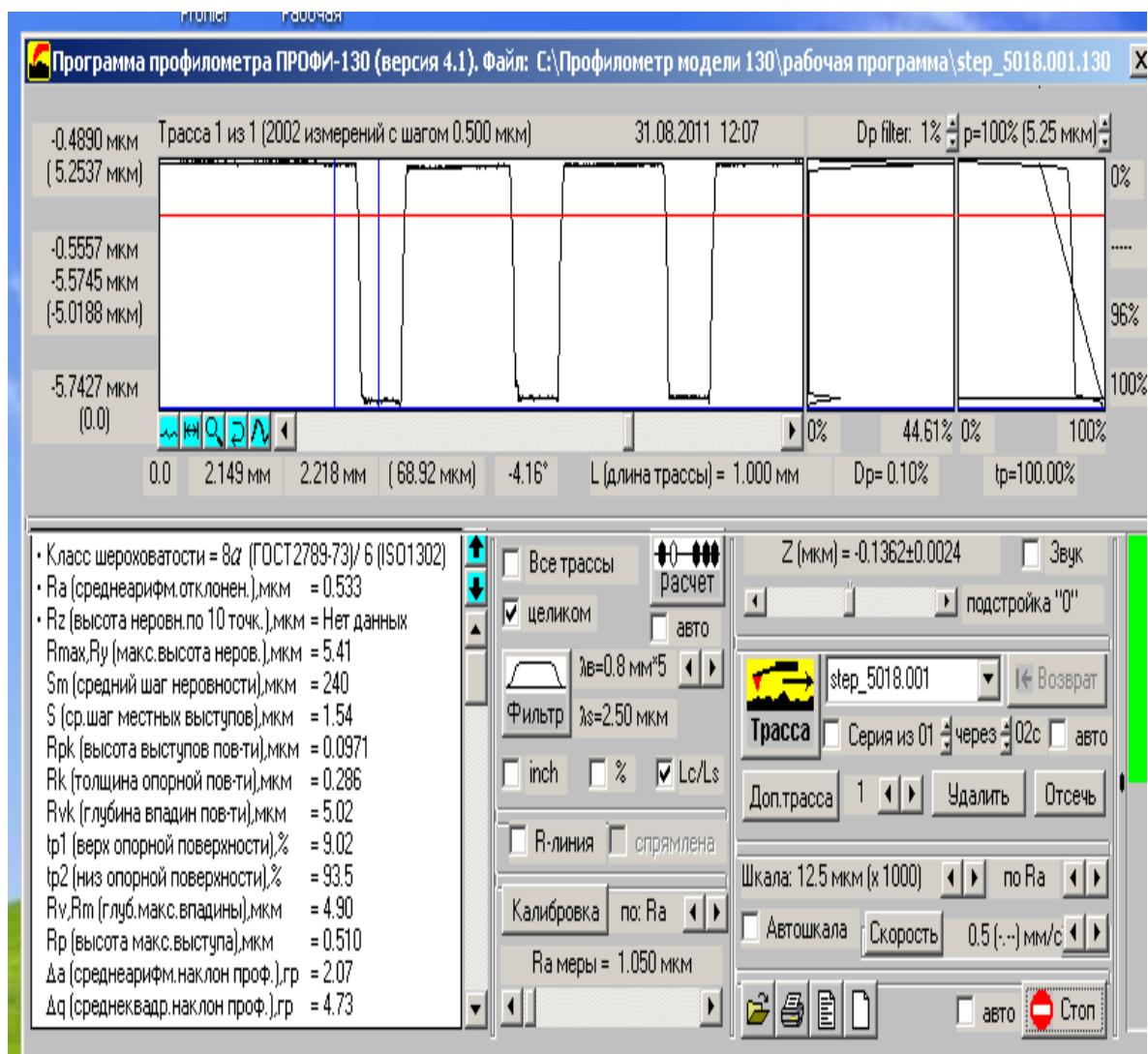


Рисунок 2.2 Профилометр -130. Измерение тестового образца от Talysurf CCI: канавки 5018 нм



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СЕРТИФИКАТ

об утверждении типа средств измерений

PATTERN APPROVAL CERTIFICATE
OF MEASURING INSTRUMENTS

RU.C.27.004.A № 26057

Действителен до
" 01. января 2012 Г.

Настоящий сертификат удостоверяет, что на основании положительных
результатов испытаний утвержден тип профилометров модели 130

наименование средства измерений
ОАО "Завод Протон-МИЭТ", г. Москва
наименование предприятия-изготовителя

который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под
№ 33319-06 и допущен к применению в Российской Федерации.

Описание типа средства измерений приведено в приложении к настоящему
сертификату.

Заместитель
Руководителя



В.Н.Крутиков

15. 12. 2006 г.

Продлен до

"....."..... Г.

Заместитель
Руководителя

"....."..... 200 г.

260057

Рисунок 2.3 Копия Сертификата средства измерения для профилометра модели 130



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы»

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ 203-2031

Действительно до
«17» августа 2013 г.

Средство измерений

Профилометр модели 130

НАИМЕНОВАНИЕ, ТИП

СЕРИЯ И НОМЕР КЛЕЙМА ПРЕДЫДУЩЕЙ ПОВЕРКИ (ЕСЛИ ТАКИЕ СЕРИЯ И НОМЕР ИМЕЮТСЯ)

Заводской номер *110823074*

Принадлежащее *ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ»*

НАИМЕНОВАНИЕ ЮРИДИЧЕСКОГО (ФИЗИЧЕСКОГО) ЛИЦА, ИНН

ИНН 7735127119

Поверено и на основании результатов первичной (периодической)
поверки признано годным к применению.

Поверительное клеймо



Начальник отдела 203

[Signature]
ПОДПИСЬ

В.Г. Лысенко

И.О. ФАМИЛИЯ

Поверитель

[Signature]
ПОДПИСЬ

В. А. Костеев

И.О. ФАМИЛИЯ



«17» августа 2011 г.

204011

Рисунок 2.4 Свидетельство о поверке профилометра модели 130, установленного в ЦКП ИФМ РАН

2.2.2 Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000

Поставленный в комплекте I части установки СММ-2000 сканирующий зондовый СММ-2000 предназначен для внеплазменного контроля поверхностей. Для него выполнены пуско-наладочные работы и ввод в эксплуатацию. Прибор имеет большой набор режимов: сканирующая туннельная микроскопия постоянной высоты (СН-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 (СН-AFM), атомно-силовая микроскопия высоких магнитных полей образца (M-AFM), атомно-силовая микроскопия электропроводности и электрических потенциалов образца (EAFM), 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 (СН-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).

Вместе с прибором получены описания методик:

- Методика сканирующей туннельной микроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;

- Методика атомно-силовой микроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика сканирующей туннельной спектроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика электрофизических измерений многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика нанолитографии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика магнито-резонансной и магнито-статической микроскопии многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика силовой модуляционной микроскопии для изучения упругости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика вискозиметрической сканирующей микроскопии для изучения вязкости многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;
- Методика адгезионной сканирующей микроскопии в установках для изучения адгезионной способности многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур;

На рисунке 2.5 приведена копия рабочего окна программы управления и обработки СММ-2000 при съемке образца подложки кремния. AFM изображение и профиль поверхности Si 7.485 нм x 7.485 нм x 29.64 нм получены в режиме 512 x 512 точек.

Прибор внесен в Государственный реестр средств измерения, регистрационный № 46918-11, см. копию сертификата на рисунке 2.6. Перед поставкой прибор прошел первичную метрологическую поверку, см. Акт поверки на рисунке 2.7.

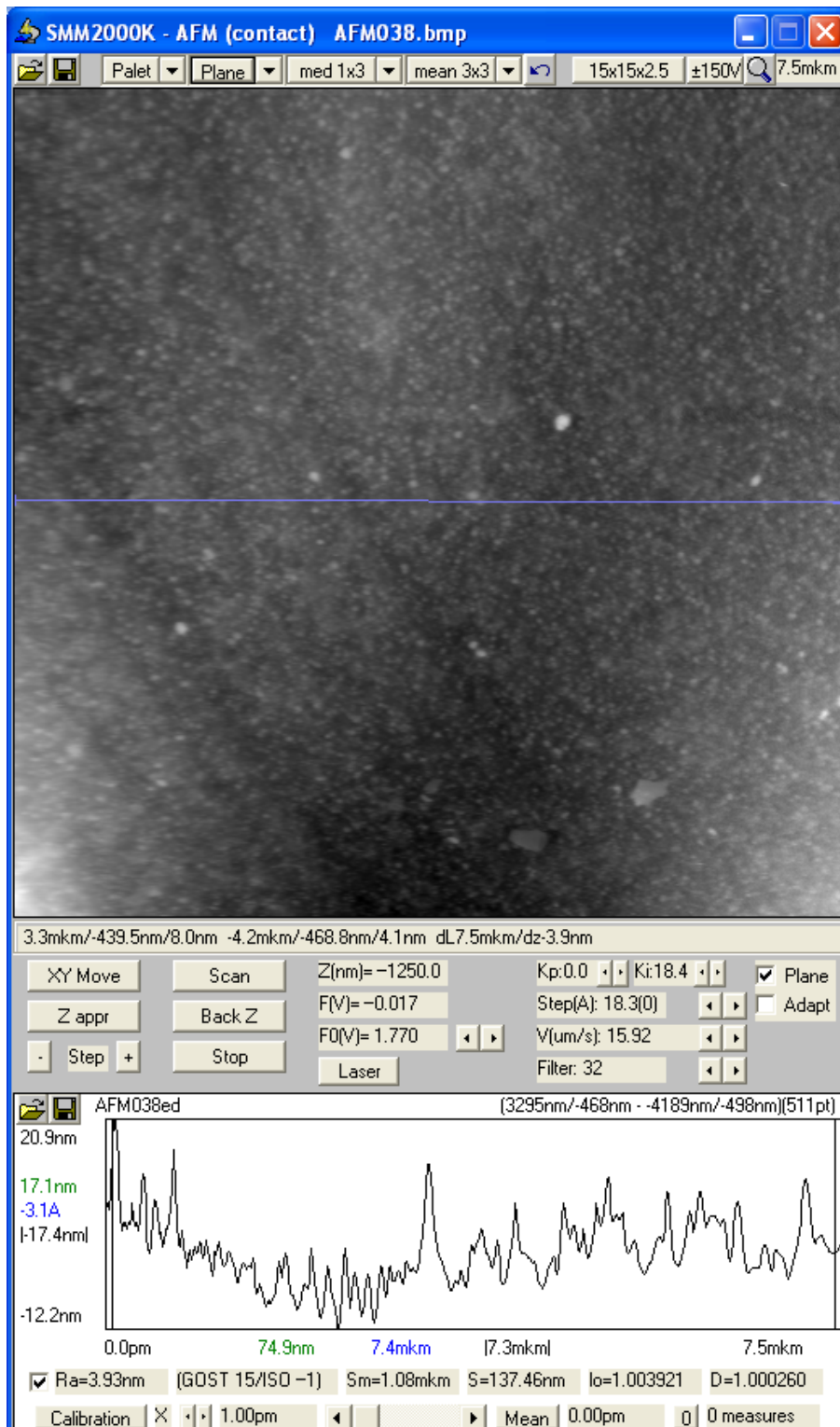


Рисунок 2.5 AFM изображение и профиль поверхности Si 7.485 нм x 7.485 нм x 29.64 нм, полученное на микроскопе СММ-2000 в режиме 512 x 512 точек



126

Рисунок 2.6 Свидетельство об утверждении типа средств измерений на микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы»

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ 203-185

Действительно до
«06» июня 2012 г

Эталон (средство измерений) Микроскоп сканирующий зондовый
НАИМЕНОВАНИЕ, ТИП (ЕСЛИ В СОСТАВ СРЕДСТВА)

СММ – 2000

ИЗМЕРЕНИЙ ВХОДЯТ НЕСКОЛЬКО АВТОНОМНЫХ БЛОКОВ, ТО ПРИВОДЯТ ИХ ПЕРЕЧЕНЬ

СЕРИЯ И НОМЕР КЛЕЙМА ПРЕДЫДУЩЕЙ ПОВЕРКИ (ЕСЛИ ТАКИЕ СЕРИЯ И НОМЕР ИМЕЮТСЯ)

Заводской номер (номера) № 100808022

Принадлежащее ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ»

НАИМЕНОВАНИЕ ЮРИДИЧЕСКОГО (ФИЗИЧЕСКОГО) ЛИЦА, ИНН

ИНН 7735127119

поверено в соответствии с МП в РЭ
НАИМЕНОВАНИЕ И НОМЕР ДОКУМЕНТА, НА МЕТОДИКУ ПОВЕРКИ

с применением эталонов КВАРЦ-ХУ1400/Z90нм
НАИМЕНОВАНИЕ, ЗАВОДСКОЙ НОМЕР, РАЗРЯД

КЛАСС ИЛИ ПОГРЕШНОСТЬ

при следующих значениях 20,5 °С
влияющих величин ПРИВОДЯТ ПЕРЕЧЕНЬ ВЛИЯЮЩИХ

Поверено и на основании результатов первичной (периодической) поверки
признано годным к применению.



Зам. начальника отдела 203

ПОДПИСЬ

Н.А. Табачникова
ИНИЦИАЛЫ, ФАМИЛИЯ

Поверитель

ПОДПИСЬ

С. С. Голубев
ИНИЦИАЛЫ, ФАМИЛИЯ

«06» июня 2011 г.

238015

Рисунок 2.7 Свидетельство о метрологической поверке на микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000, поставленный в ЦКП ИФМ РАН

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ЦКП ИФМ РАН

Разработка опиралась на предыдущие варианты Программы развития ЦКП ИФМ РАН, а также на «Комплекс мер по стимулированию использования оборудования центров коллективного пользования третьими лицами», утвержденный приказом Минобрнауки от 27 октября 2011 года № 2561. Программа приведена в Приложении А к настоящему отчету.

За основу взята Программа развития ЦКП ИФМ РАН, разработанная в 2008 году в рамках выполнения ГК 02.552.11.7015. Ряд конкретных мероприятий за прошедшие 3 года уже был выполнен, что потребовало корректировки Программы. Например, такие пункты как «размещение и ввод в эксплуатацию нового вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-100P», «закупка и ввод в эксплуатацию рентгеновского дифрактометра высокого разрешения» заменены на работы со следующим поколением оборудования, см. разделы 1 и 2. Часть из пунктов старой программы, отражающих специфику ЦКП ИФМ РАН, не утратили своей актуальности и введены в новую редакцию. К таким, например, относятся «расширение прямого доступа к приборам для сотрудников ИФМ РАН, аспирантов и дипломников», раздел 5, пункт 2, «проведение лабораторных работ для студентов и аспирантов на оборудовании ЦКП», раздел 6 пункт 4. Эти пункты важны тем, что прямой доступ и выполнение лабораторных работ повышают полезную загрузку оборудования, а с другой стороны, способствуют расширению круга потребителей услуг ЦКП. При выполнении этих работ приходится иметь в виду тот факт, что оборудование, к которому разрешен прямой доступ, должно обладать повышенной устойчивостью к ошибочным действиям оператора, и далеко не все приборы выдерживают такой режим работ.

Кроме специфических для ЦКП ИФМ РАН пунктов в Программу включены положения, общие для всех ЦКП. Ряд формулировок взят из «Комплекса мер по стимулированию использования оборудования центров коллективного пользования третьими лицами», утвержденного приказом Минобрнауки от 27 октября 2011 года № 2561. Это актуализация Перечня услуг ЦКП, заключение долгосрочных договоров на услуги, поддержка и обновление интернет-сайта ЦКП, освещение в средствах массовой информации сведений о ЦКП и другие.

Программа включает в себя основные пункты развития ЦКП. Она не включает полный план работы ЦКП, хотя содержит конкретные примеры мероприятий. Конкретные планы развития ЦКП ИФМ РАН составляются на год, они учитывают реальные перспективы

получения нового оборудования, его ввод в эксплуатацию, наличие действующих госконтрактов и хоздоговоров.

Примером освещения в средствах массовой информации сведений о ЦКП ИФМ РАН является публикация в научно-производственном журнале «Нанотехнологии. Экология. Производство», №4 2011 г. материалов о ЦКП ИФМ РАН, см. рисунок 3.1.



Рисунок 3.1 Публикация материалов о ЦКП ИФМ РАН в научно-производственном журнале «Нанотехнологии. Экология. Производство», №4. С.58. 2011

4 ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ СТОРОННИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

4.1 Организация исследований в интересах сторонних организаций в ЦКП ИФМ РАН

Согласно действующему «Положению о Центре коллективного пользования научным оборудованием “ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР” (ЦКП ИФМ РАН)», документ прилагается, основной целью 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.

Услуги коллективного пользования научным оборудованием могут предоставляться как на возмездной, так и на безвозмездной основе. Оказание услуг на возмездной основе 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 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, 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». Следует отметить, что в настоящее время большой объем работ, выполняемых ЦКП ИФМ РАН в рамках совместных НИР ИФМ РАН с другими научными организациями, остается неоформленным документально.

4.2 Исследования в интересах сторонних организаций, выполненные в ЦКП ИФМ РАН

На этапе 2 выполнялись работы как для новых сторонних организаций - заказчиков услуг, так и для организаций, отраженных в отчете за этап 1. Всего 9 новых сторонних организаций - заказчиков услуг. Вместе с представленными на этапе 1 – 17 организаций – пользователей за 2011 год, см. Приложение Б к настоящему отчету.

Более подробно данные о работах на этапах 1 и 2 представлены в «Справке о числе организаций-пользователей научным оборудованием ЦКП», Приложение 18.6, где приведен список выполненных работ. Как описано в предыдущем подразделе, работы для сторонних организаций 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 и в Справку, Приложение 18.6, включены только организации, работы с которыми относятся к типу 1 и 2, т.е. имеют документальное подтверждение.

Справка 18.6 показывает, что основной объем запросов идет на масс-спектрометрические исследования на приборе TOF.SIMS-5 (Исследование примесного состава слоев. Послойный элементный анализ структур ZnSe. Измерение элементного состава образцов пород грунта. Анализ элементного состава образцов ZnSe:Cr. Анализ элементного состава покрытия.) Этот факт не удивителен, поскольку время-пролетный масс-спектрометр TOF.SIMS-5 является уникальным по возможностям прибором с широким спектром приложения к разнообразным задачам материаловедения. В то же время, его высокая стоимость (52 млн. руб.) не позволяет закупить этот прибор другим организациям региона. В ЦКП ИФМ РАН он был приобретен за счет средств предыдущего госконтракта по мероприятию 5.2.

5 РАЗРАБОТКА НОВЫХ ВИДОВ УСЛУГ И ОБНОВЛЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ УСЛУГ ЦКП ИФМ РАН

В ЦКП ИФМ РАН постоянно ведутся работы по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. В подразделе 1.1 настоящего отчета предложена новая методика оценки параметров структуры низкобарьерных диодов, изготовленных на основе эффекта приповерхностного дельта-легирования, из обработки температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик. Это стало возможно благодаря разработанной для них теории переноса носителей через модифицированный барьер металл-полупроводник. В подразделе 1.2 описан новый метод прямого определения глубины залегания расположенных близко к поверхности тонких слоев (δ -слоев) при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5. С этой целью была подробно экспериментально исследована функция разрешения по глубине TOF.SIMS-5 для нескольких типов анализируемых структур при различных параметрах эксперимента.

Включение новых измерительных методик в Перечень услуг ЦКП кроме разработки методики требует выполнения этапа экспериментального тестирования на сериях образцов, анализа результатов экспериментов по внутри- и межлабораторной воспроизводимости, а также по оценке точности путем измерения тестовых образцов. В Приложении Д приведен обновленный Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН. В ходе выполнения настоящего этапа в Перечень дополнительно введена услуга №15 «Послойный анализ гетеросистем GeSi/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5» с использованием методики калибровки концентрации матричных элементов, описанной в п.5.4.1 Отчета по этапу 1 настоящего госконтракта.

6 ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ СИСТЕМЫ РАДИОВИДЕНИЯ 3-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН И ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ (внебюджетное финансирование)

Выполнены разработки по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн. В подразделе 6.1 предложена структурная схема и произведён выбор основных узлов быстродействующей цифровой системы регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов. Предложенная система является удобной для передачи, предварительной обработки, хранения и визуализации радиоизображений.

В области рентгеновской литографии выполнены работы по отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм. В подразделе 6.2 сообщается об оптимизации структуры и состава маски для стенда ЭУФ литографа, разработанного в ИФМ РАН: выбор материала антиотражающего (поглощающего) покрытия, материалов стоп-слоев для травления структуры и многослойной интерференционной структуры, отражающей рабочую длину волны. Описывается технологии изготовления, и приводятся результаты измерений отражательных и геометрических (толщина поглощающего слоя, ширины штрихов и шероховатости краев линий маски) характеристик маски. Предлагается новый и прямой метод аттестации дефектов масок с размерами от 30 нм и более.

В подразделе 6.3 рассматривается система освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм. Основными элементами данной системы являются источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, сферическое зеркало-коллектор и составное зеркало (гомогенизатор), которое состоит из 25 минизеркал и обеспечивает равномерную засветку требуемой области на маске. В работе приводятся численные расчеты параметров минизеркал и дается сравнение с экспериментом. Приводятся данные коэффициентов отражения минизеркал в окрестности 13,5 нм.

6.1 Система регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов

Устройство регистрации данных с матрицы размерностью 8x8 элементов должно содержать коммутатор сегментов матрицы, нормирующие усилители, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер (МК) с каналом обмена данных с компьютером (ЭВМ). Структурная схема устройства приведена на рис. 6.1. Блоки пАМ 8x1 представляют собой аналоговые мультиплексоры, имеющие 8 аналоговых входов, 1 аналоговый выход и 3-х битовый вход управления. На аналоговые входы 1АМ 8x1

подаются предварительно усиленные и смещенные по уровню на -1В сигналы с 1, 9, 17, 25, 33, 41, 49 и 57-го элемента матрицы, на входы 2АМ 8x1 - с 2, 20, 18, 26, 34, 42, 50 и 58-го элемента матрицы и т.д. Буферные усилители (БУ) помещены на выходах nАМ 8x1 (8 шт.) для обеспечения работы на внешний кабель, соединяющий блок мультиплексоров с входами аналогового мультиплексора АЦП.

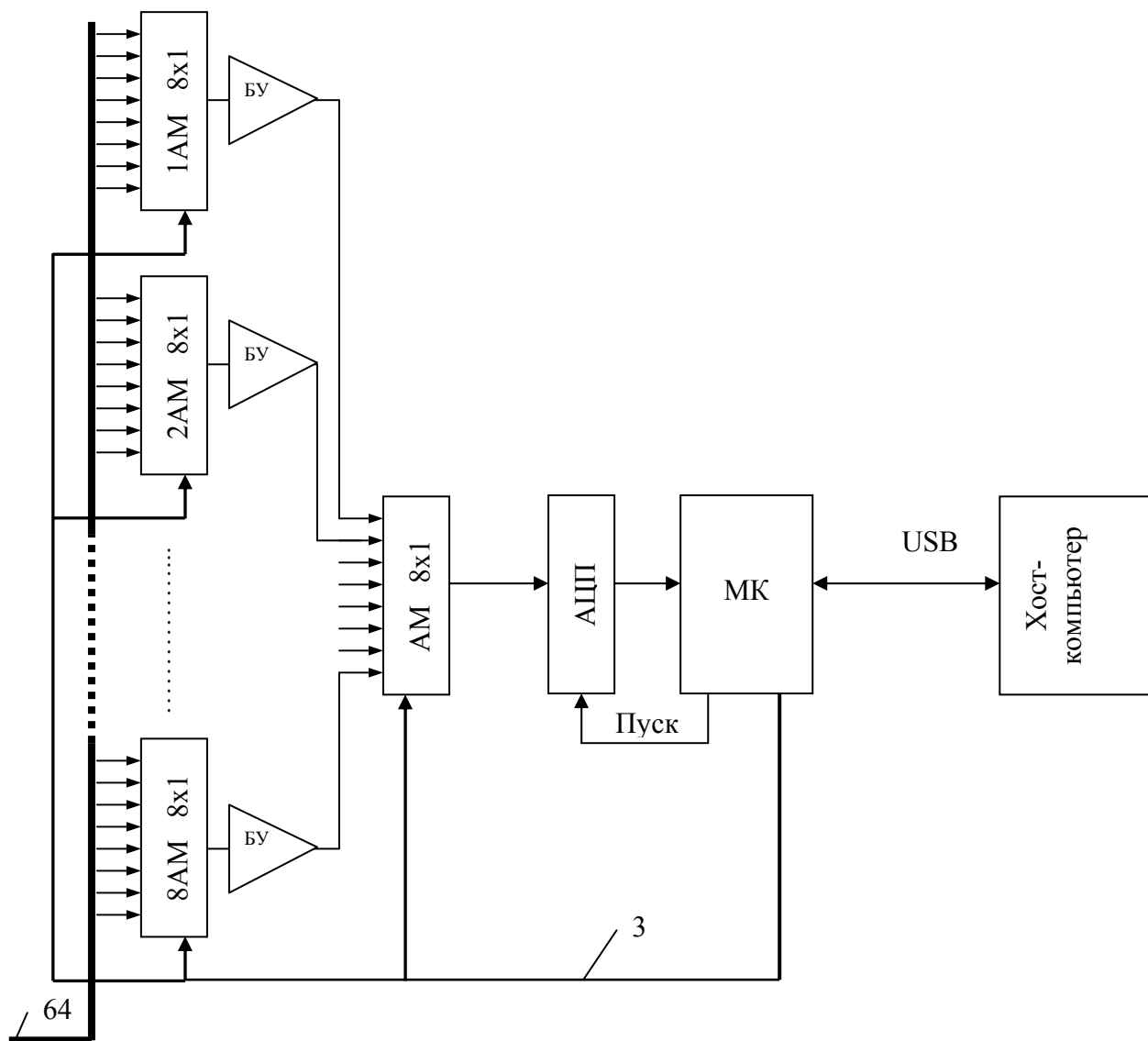


Рисунок 6.1 Структурная схема устройства регистрации данных с матрицы размерностью 8x8 элементов

На цифровые входы мультиплексоров поступают управляющие сигналы с выходного порта микроконтроллера МК. Формирование сигналов управления должно быть синхронизировано с сигналом запуска АЦП. Упрощенная временная диаграмма

выборки из сигнала с первых 8-ми элементов матрицы приведена на рисунке 6.2. При такой организации системы регистрации происходит последовательный опрос всех элементов матрицы. Естественно, выборки с разных элементов матрицы будут произведены в разное время. Разница во времени между выборками из сигнала первого и последнего элементов матрицы исчисляется десятками микросекунд (расчёты приведены ниже).

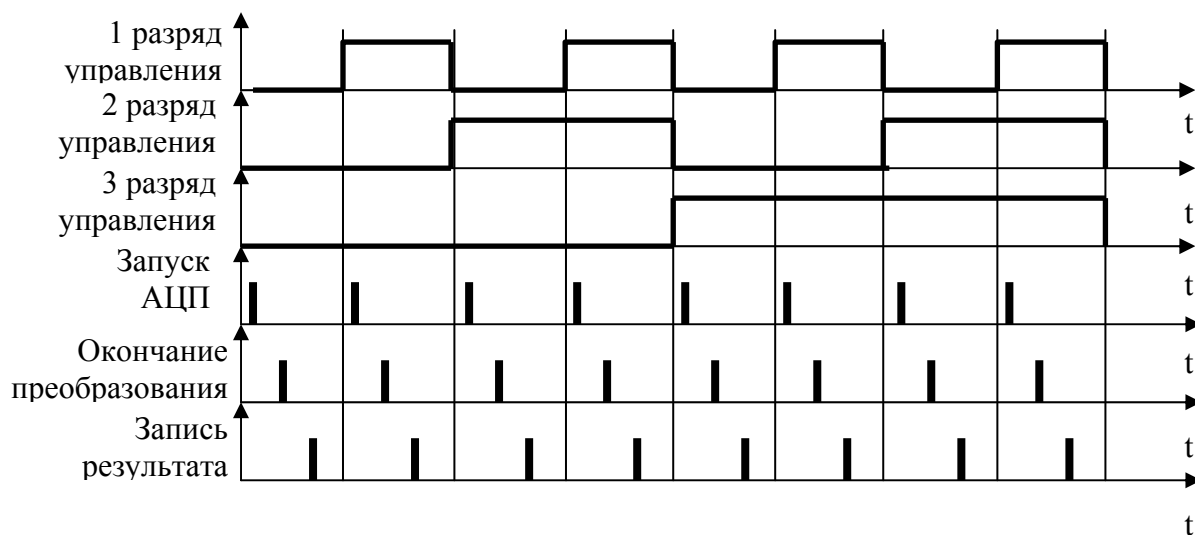


Рисунок 6.2 Упрощенная временная диаграмма выборки из сигнала с первых 8-ми элементов матрицы.

Результаты измерений 64 элементов матрицы должны быть переданы микроконтроллером в хост-компьютер по какому-либо из используемых в настоящее время интерфейсов. Был выбран распространенный интерфейс USB, который в состоянии обеспечить скорость передачи данных до 12 Мб/с на расстояние до 5 метров без применения хабов. Для обеспечения передачи данных со стороны МК необходимо программно сформировать все необходимые атрибуты узла USB МК и дескриптор устройства, задать количество конечных точек и объемы передаваемой информации. Для этой же цели со стороны хост-компьютера необходимо спроектировать драйвер нижнего уровня, который обеспечит прием данных от МК на физическом уровне, и драйвер верхнего уровня, который обеспечит работу графического интерфейса пользователя и других частей приложения. Фактически, на первом этапе работы на МК возложена функции управления сбором информации с матрицы и конвертора «пользовательская информация, представленная параллельным кодом, — поток данных формата USB».

Ориентировочно предположим, что АЦП имеет 12 разрядов и способен работать со скоростью не менее 10^6 выборок в секунду. При этом:

- измерение всей матрицы (1 кадр) займет ~ 64 мкс (15 кГц),
- объем кадра при двух байтовом слове, содержащем результат измерения, составит $2 \times 8 \times 64 = 1024$ бита.

При непрерывных измерениях скорость потока информации составит $1024 \cdot 15000 = \sim 15$ Мб/с (скорость входного потока). При скорости передачи по каналу USB 12 Мб/с (режим Full Speed) опрашивать матрицу на полной скорости не удастся. Выравнивание скоростей входного и выходного потоков нужно за счет введения некоторого времени обратного хода кадров, что снизит скорость входного потока.

Блоки АМ 8x1 и АЦП могут входить в состав микроконтроллера МК. В основные функции МК входит:

- формирование темпа опроса матрицы,
- переключение входов блоков АМ,
- запуск АЦП,
- чтение данных АЦП,
- обработка данных,
- передача данных по каналу USB.

На ЭВМ возлагаются функции визуализации измерений и хранение данных. Такая структура, кроме создания аппаратной части, предполагает еще разработку ПО для МК и ЭВМ.

АЦП с входным коммутатором на 8 каналов и узел USB могут быть включены в состав МК. Тогда структурная схема упрощается и принимает вид, показанный на рисунке 6.3. Для того чтобы перейти к возможности наращивать количество матриц до 9, а количество элементов, соответственно, до $3 \times 8 \times 3 \times 8 = 576$, упростим изображение структурной схемы, объединив все аналоговые элементы в один. Схема примет вид, показанный на рисунке 6.4, и будет в дальнейшем называться модулем.

9 модулей, изображенных на рисунке 6.5, в состоянии выполнить задачу параллельно –последовательной регистрации данных с 9-ти матриц за время, равное времени регистрации данных с одной матрицы. Для сбора информации со всех 9-ти модулей один из них должен выполнить задачу контроллера устройства регистрации, а все остальные должны быть связаны с ним для передачи данных по одному из имеющихся у современных МК интерфейсов, например SPI (Serial Peripheral Interface) . В этом случае увеличится время передачи данных на хост компьютер.

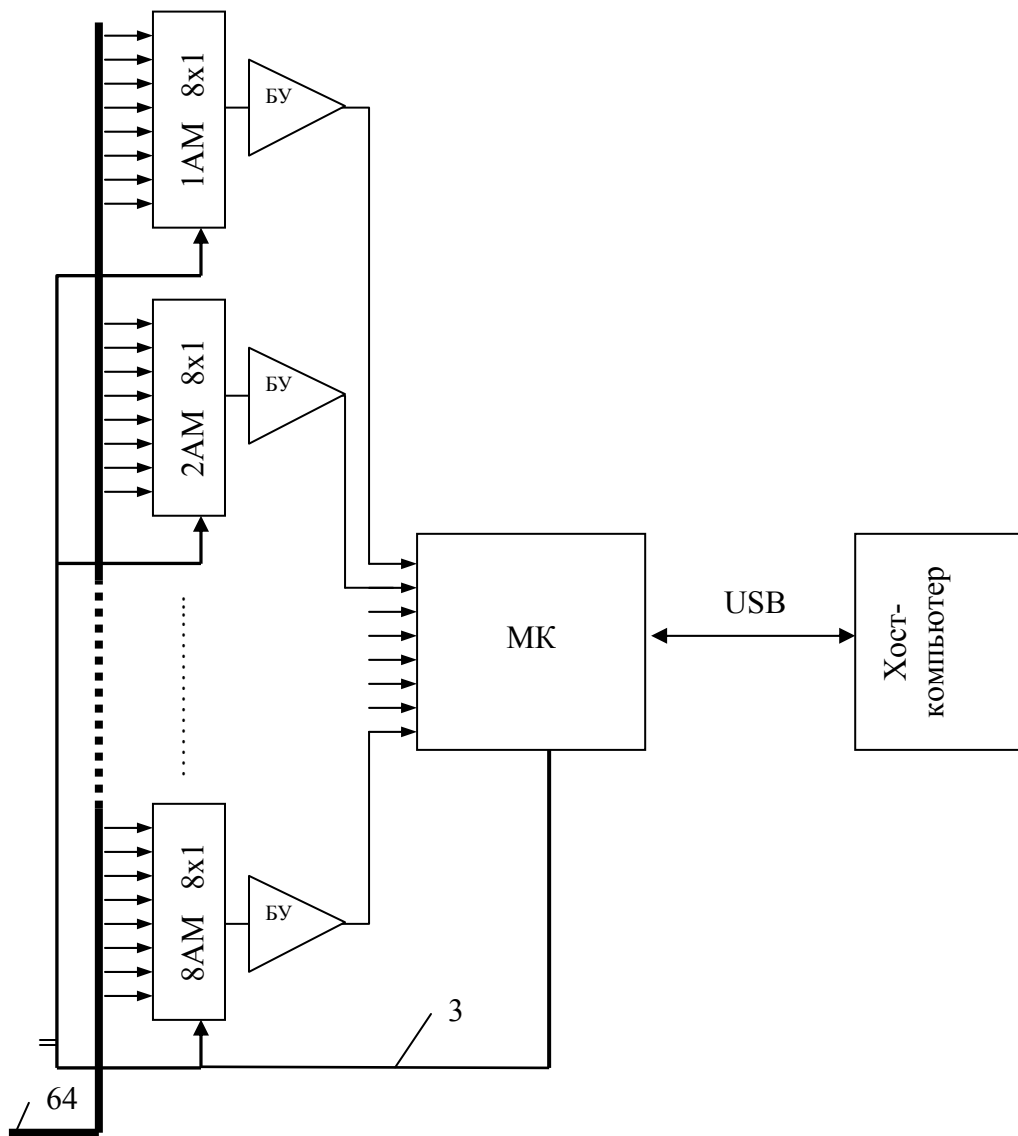


Рисунок 6.3 Вариант упрощения структурной схемы устройства регистрации данных

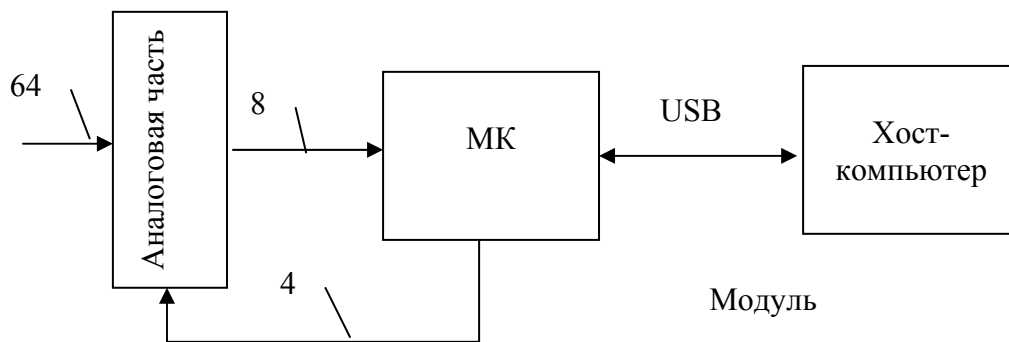


Рисунок 6.4 Схема модуля

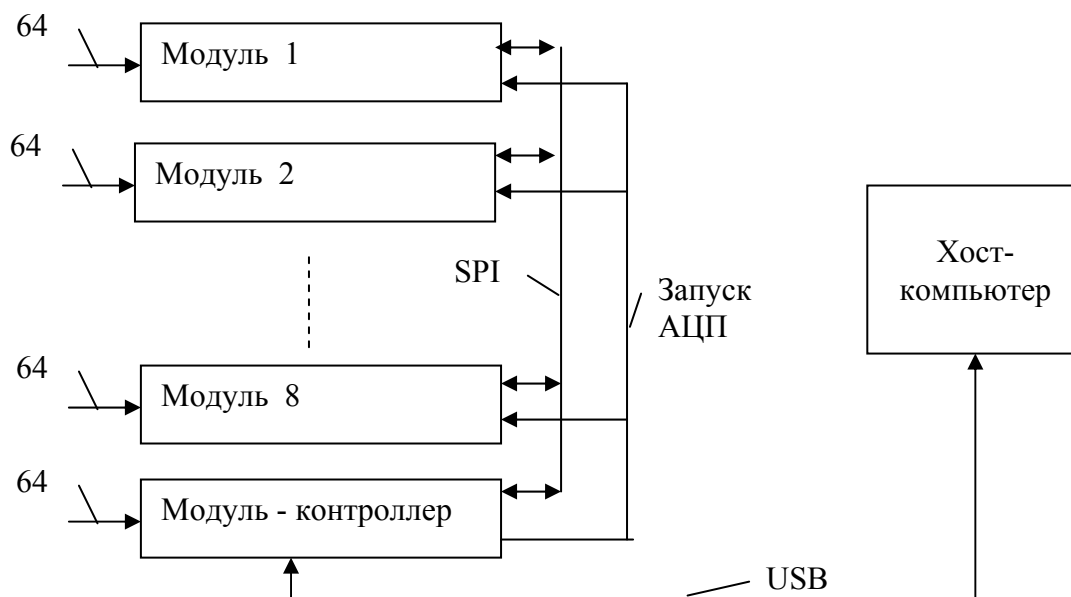


Рисунок 6.5 Схема параллельно – последовательной регистрации данных

Оценим скорость работы системы в такой конфигурации. Представим, что обмен данными между одним из модулей происходит по интерфейсу SPI на частоте 20 МГц. Тогда время передачи одного измерения от модуля к контроллеру равно $64 \times 2 \times 1 / (20 \times 10^6) = 6,4$ мкс. Время передачи данных от 8-ми модулей контроллеру $6,4 \times 8 = 51$ мкс. Время передачи с применением интерфейса USB вносит основной вклад в общее время регистрации данных и составит $\sim 1/1,3$ кГц = 0.76 мс.

6.1.1 Выбор микроконтроллера

Опираясь на предварительный анализ, можно сформулировать основные требования к МК:

- наличие встроенного АЦП с аналоговым мультиплексором не менее, чем на 8 каналов,
- число разрядов АЦП 10 – 12, что соответствует динамическому диапазону 60 – 72 дБ,
- частота выборок – не менее 1МГц,
- тактовая частота МК – не менее 60 МГц,
- разрядность - 16 – 32,
- наличие встроенного контроллера USB не хуже Full Speed (12Мб/с),
- наличие встроенного интерфейса SPI со скоростью работы 15 – 20 МГц.

Анализ моделей МК лидеров рынка привел к выбору МК фирмы Atmel: AT32UC3C0512C.

Важные технические характеристики МК.

- Высокоэффективный, с малым потреблением, 32-разрядный микроконтроллер AVR®:

- компактная одноканальная система команд RISC, включающую систему команд DSP,
- встроенный Процессор с плавающей запятой (FPU),
- команды "чтение - модификация - запись" и побитовая обработка,
- скорость работы до 1,49 млн. операций/с / МГц.
- До 91 млн. операций/с при работе на тактовой частоте 66 МГц от Flash памяти.
- До 49 млн. операций/с при работе на тактовой частоте 33 МГц от Flash памяти.
- модуль защиты памяти.
- Внутренняя высокоскоростная Flash память 512 килобайт:
 - доступ за один цикл до 33 МГц,
 - буфер предварительной выборки для оптимизации выполнения команды на предельной скорости,
 - 100 000 циклов записи, 15-летний срок хранения данных.
- Внутреннее высокоскоростное ОЗУ с одноактным доступом на предельной скорости 64 килобайт/с.
- Интерфейс внешней памяти.
- Контроллер прерывания.
- Системные функции:
 - менеджер питания и тактовых импульсов,
 - внутренние 115 кГц (RCSYS) и 8МГц/1МГц (RC8M) RC-генераторы,
 - один 32 кГц и два универсальных генератора,
 - обнаружение отказов тактовых импульсов,
 - две схемы фазовой автоподстройки, обеспечивающие независимость частот центрального процессора от USB.
- Универсальная последовательная шина (USB):
 - устройство 2.0 и встроенный низкоскоростной и полноскоростной хост,
 - гибкая конфигурация конечной точки и управление выделенными каналами прямого доступа в память,
 - встроенные приемопередатчики, включая подтягивающие резисторы.
- Один 12-битовый аналого-цифровой преобразователь с 16 каналами:
 - двойная система выборки - хранения, обеспечивающая 2 синхронных преобразования,
 - несимметричные и дифференциальные каналы, оконная функция.
- Шесть каналов 16-разрядных таймер/счетчиков:
 - внешние синхронизирующие входы, PWM, привязка и различные возможности счета.
- Два последовательных интерфейса периферийных устройств (SPI) с сигналами выбора кристалла.

- Корпус LQFP с 144 контактами (123 контакта входов/выходов общего назначения).
- Два диапазона рабочего напряжения:
 - один источник питания 5 В,
 - один источник питания 3,3 В.

Приведенные технические характеристики AT32UC3C0512C говорят о том, что выбранный микропроцессор обладает большой разрядностью слова, достаточно высокой производительностью благодаря относительно большой тактовой частоте и высокому показателю производительности, как 1,49 млн. операций/с / МГц. Процессор такого микроконтроллера способен не только оцифровывать сигнал одной матрицы и передавать результаты в ЭВМ, но может проводить первичную обработку, например, накопление или усреднение и работать совместно с другими МК.

Рассмотрим три наиболее интересующих нас узла МК, определяющих свойства системы в целом.

6.1.2 Узел USB

Свойства:

- Совместим с USB 2.0.
- Поддерживает полноскоростной (12Мб/с) и низкоскоростной (1.5Мб/с) режимы коммуникации.
- 7 каналов/конечных точек в режиме пинг-понга (обсуждение приведено ниже).
- Гибкая конфигурация канала/конечной точки и перераспределение буферов данных во встроенной оперативной памяти.
- До двух банков памяти на канал/конечную точку (не для управляющего канала/конечной точки).
- Встроенные приемопередатчики, включая подтягивающие и заземляющие резисторы нагрузки.

Важными свойствами контроллера USB МК AT32UC3C0512C является возможность настройки размера буферов обмена конечных точек (максимальный размер буфера – 1023 байта) и наличие двух буферов на каждую конечную точку, что позволяет МК заполнять один буфер данными и обмениваться по каналу USB, используя другой и попеременно меняя их местами. Такая организация обмена называется функцией пинг-понга и позволяет максимально плотно заполнять фрейм USB данными.

6.1.3 Узел АЦП

Технические характеристики контроллера АЦП:

- 8/10/12-битное ядро АЦП со встроенной двойной выборкой и хранением (S/H).

- 16 входных аналоговых каналов.
- До 1.5 мегавыборок/с (Msps) при разрешающей способности 12 бит:
 - время преобразования близко к 5,3 мкс (разрешающая способность 12 бит при 1,5 Msps).
- До 2 Msps для более низкой разрешающей способности (8-10 бит):
 - время преобразования близко к 3,5 мкс (разрешающая способность 10 бит при 2 Msps),
 - время преобразования близко к 3 мкс (разрешающая способность 8 бит при 2 Msps);
- Несколько опорных источников:
 - внутренний источник опорного напряжения 1 В,
 - внутренний источник опорного напряжения 0,6 x внутреннее напряжение VDDANA,
 - два напряжения внешнего опорного напряжения.
- Прямые измерения или с выборкой-хранением.
- Имеется аппаратно-программное устройство, позволяющее задать последовательность опроса аналоговых каналов, называемое секвенсером. Можно управлять как двумя независимыми секвенсерами с 8 состояниями, работающими с собственными S/H (режим двойного секвенсера), или как один большим секвенсером с 16 состояниями (режим одинарного секвенсера).
- 16 регистров результата.
- Выбор источника для начала преобразования (SOC):
 - программный запуск,
 - встроенный таймер,
 - контроллер периферийного события,
 - непрерывный запуск.
- Два режима секвенсера:
 - выполнить всю последовательность от SOC,
 - выполнить однократное преобразование от SOC.
- Гибкое управление прерыванием разрешает запрос на прерывание при каждом конце последовательности или при каждом отдельном преобразовании.
- 2 канала прямого доступа в память от периферии PDCA (один на секвенсер).
- Режимы пониженной мощности.

Узел АЦП спроектирован очень гибким, чтобы пользователь имел массу возможностей для конфигурации АЦП под различные условия применения. Важными свойствами узла АЦП являются:

- наличие аналогового коммутатора 16-ти каналов с возможностью измерения как балансных, так и несимметричных сигналов,
- наличие секвенсера, позволяющего установить число и порядок опроса входных каналов,
- наличие разных режимов запуска, в частности режима, в котором по одному сигналу запуска контроллер АЦП выполняет измерения всех назначенных каналов; в этом случае пользователя не заботит анализ окончания преобразования каждого канала и учет времени переключения входного аналогового мультиплексора (коммутатора каналов),
- возможность изменения разрядности АЦП, что на начальном этапе исследований кажется весьма полезным,
- возможность получать результат измерений, сдвинутый к левому или правому краю 32-х разрядного слова, что может помочь при упаковке результатов в буфер передачи данных по каналу USB,
- возможность режима работы, как с использованием системы выборки-хранения, так и без нее.

Предложенная гибкая структура контроллера АЦП позволяет провести измерения в оптимальном для конкретного приложения режиме с точки зрения шумов и скорости регистрации.

6.1.4 Узел контроллера SPI

Технические характеристики контроллера SPI:

- Поддерживает связь с последовательными внешними устройствами:
 - четыре выхода для выбора кристалла позволяют поддерживать до 15 периферийных устройств поочередно,
 - блоки памяти, типа Data Flash и трехпроводные СППЗУ,
 - периферийные устройства, типа АЦП, ЦАП, контроллеров индикатора на жидких кристаллах, контроллеров CAN и Датчиков,
 - внешние сопроцессоры.
- Режим ведущий или ведомый:
 - от 4 до 16-разрядов программируемая длина данных,
 - программируемая фаза и полярность,
 - программируемые задержки передачи между тактовыми импульсами и данными,
 - программируемое время задержки между передачами,
 - выбираемый режим обнаружения неисправностей.

- Подключение к периферийному контроллеру прямого доступа в память:

- один канал для приемника, один канал для передатчика,
- FIFO при приеме.

Важными свойствами узла SPI представляются:

- возможность поддержания ведущим до 15 ведомых внешних устройств (в нашем случае их 8),
- возможность настройки длины передаваемого слова (в нашем случае 12 или 16 бит),
- возможность введения регулируемой задержки между тактовыми импульсами и данными, что очень важно на скоростях обмена 15 – 20 МГц.

Узел интерфейса SPI также спроектирован весьма гибким, что позволит оптимально настроить процедуру обмена на минимальное время.

Таким образом, предложена структурная схема и произведён выбор основных узлов быстродействующей цифровой системы регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов. Предложенная система является удобной для передачи, предварительной обработки, хранения и визуализации радиоизображений.

6.2 Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм

В настоящее время признано, что проекционная ЭУФ (экстремальное ультрафиолетовое излучение) литография на длине волны $\lambda=13,5$ нм является наиболее рентабельной для массового изготовления современных интегральных схем. И хотя есть еще ряд нерешенных технических проблем, ожидается, что по этой технологии начнется производство микросхем с минимальными размерами элементов 32-22 нм в течение следующих трех лет (2012-2014 гг) [17]. В перспективе размеры элементов могут быть уменьшены до 10 нм, а при дальнейшем уменьшении рабочей длины волны излучения до $\lambda=6,7$ нм – и до 8 нм.

Принцип работы проекционной фотолитографии заключается в том, что изображение маски (шаблона), например, топологии микросхемы, с помощью проекционного объектива с уменьшением передается на подложку с фоторезистом. При этом для традиционной фотолитографии шаблон представляет собой прозрачную для рабочей длины волны подложку, на которой сформирован рисунок, не пропускающий излучение. Облучение маски производится с обратной стороны от рисунка. В рамках данной работе была разработана технология, изготовлена и изучена маска, предназначенная для станда ЭУФ литографа, разработанного в ИФМ РАН [18].

При разработке масок для ЭУФ литографии необходимо учитывать особенности взаимодействия излучения этого диапазона с веществом, ключевыми из которых являются: сильное поглощение (типичные глубины поглощения лежат в диапазоне десятков – сотен нанометров) и низкая рефракция (показатель преломления близок к единице) [19]. Исходя из этих ограничений, конструктивно-технологические особенности масок для ЭУФ литографии базируются на принципах, основными из которых являются:

1. Маски могут быть только отражательного типа. Топологический рисунок микросхемы из материала, хорошо поглощающего излучение с длиной волны 13,5 нм, наносится поверх зеркального покрытия.

2. Отражающее ЭУФ излучение покрытие представляет собой многослойную интерференционную структуру (брэгговский отражатель). Для длины волны 13,5 нм – это Mo/Si структура с числом периодов около 40 и величиной периода (бислоя) около 7 нм (примерно половина длины волны).

3. Исключительно высокие требования к дефектности масок, не более 0,003 дефекта с размером, превышающим 30 нм на одном квадратном сантиметре.

4. Минимальный размер топологического элемента на маске составляет 100 нм.

В рамках данной работы разрабатывалась экспериментальная маска, основной целью которой была проверка предельной разрешающей способности нанолитографа и изучение пространственного разрешения фоторезистов. Поэтому основное внимание уделялось геометрическим характеристикам топологических элементов (ширина и шероховатость края полос (*LER*)) и надежному подавлению излучения с длиной волны 13,5 нм слоем-абсорбером. Разработка маски включала следующие основные этапы:

1. Выбор материалов и структуры (число периодов и соотношение толщин слоев в периоде) интерференционного зеркала, обеспечивающего максимальный коэффициент отражения на рабочей длине волны.

2. Выбор материала поглощающего слоя, обеспечивающего максимальное поглощение излучения с рабочей длиной волны при минимальной толщине. Материал должен быть достаточно «стойким» с точки зрения проведения над ним различных литографических операций (напыление, травление в растворителях и кислотах, плазмо-химическое травление и др.) и обеспечивать требуемый уровень шероховатости края топологического рисунка.

3. Разработка технологии формирования рисунка в поглощающем слое.

4. Физическая реализации маски и аттестация отражательных свойств и характеристик рисунка (ширина и *LER*).

В качестве отражающей многослойной структуры была выбрана пара Mo/Si, обладающая наибольшими коэффициентами отражения на длине волны 13,5 нм, до 69-70% [20].

Одним из основных критериев при выборе материала поглощающего слоя является сильное поглощение излучения с длиной волны 13,5 нм. В таблице 6.1 приведены расчетные значения глубин проникновения излучения 13,5 нм при падении под углом $\theta=8^\circ$ от нормали к поверхности маски (угол падения в реальном нанолитографе) для ряда наиболее перспективных материалов. Обозначения в таблице h_{ex} и h_3 соответствуют толщинам поглощающей пленки, пропускание которой падает в e -раз или составляет 3%, соответственно. Присутствие Al в этой таблице, не смотря на малый заряд ядра, объясняется резонансным поглощением излучения в области за L-краем поглощения ($\lambda_{Lab}=17$ нм). Как видно из таблицы, наибольшее поглощение имеют никель и золото.

Таблица 6.1 Глубины проникновения излучения с длиной волны 13,5 нм при падении под углом $\theta=8^\circ$ h_{ex} (интенсивность падает в e -раз) и толщина поглощающей пленки, пропускание которой составляет 3% h_3 для ряда наиболее перспективных материалов.

Материал	Cr	Ni	W	Au	Ta	Al
h_{ex} , мкм	0,0273	0,0146	0,0322	0,0205	0,0260	0,0359
h_3 , мкм	0,096	0,051	0,113	0,072	0,091	0,125

Удовлетворительным сочетанием свойств обладает тантал (высота структуры менее 0,1 мкм, соответственно аспектное отношение на маске менее 1). С учетом развитой в ИФМ РАН технологии формирования танталовых наноструктур, в частности они показывают низкую шероховатость края линии при плазмо-химическом травлении, на данном этапе этот материал был выбран в качестве поглощающего слоя.

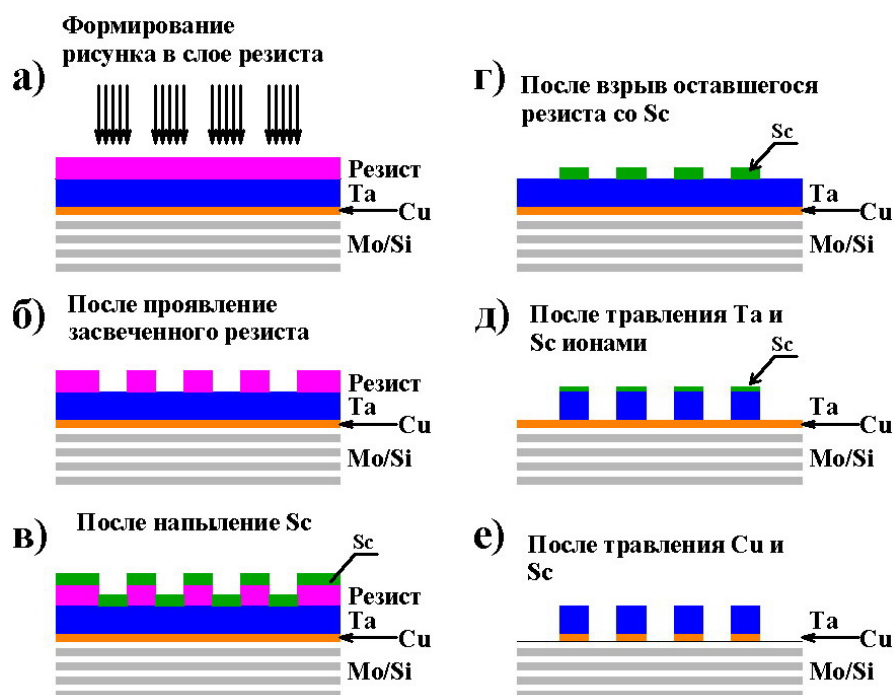


Рисунок 6.6 Технология формирования рисунка маски с помощью электронной литографии и технологий вакуумного нанесения тонких пленок и плазмохимического травления.

Рисунок 6.6 иллюстрирует технологию изготовления маски на стадии формирования рисунка (наноструктуры). После нанесения на многослойное Mo/Si зеркало медного подслоя (стоп-слой) толщиной 15 нм и слоя тантала (поглотитель) 90 нм на структуру наносится электронный резист (типичная толщина 100 нм). Далее с помощью электронной литографии формировался «скрытый» рисунок маски (рисунок 6.6а). Засвеченный фоторезист убирался с помощью жидкого проявителя. Далее поверх структуры напылялся слой Sc толщиной 20 нм (рисунок 6.6 б,в). Далее остатки фоторезиста вместе со Sc взрывались (lift-off технология) в ультразвуковой ванне (рисунок 6.6г). На завершающем этапе происходило плазмо-химическое травление Ta и Sc (рисунок 6.6 д). Так как скорость травления Sc была существенно меньше скорости травления Ta, то открытый тантал стравливался полностью, а под скандием был защищен. После этого химически удалялись остатки меди и скандия (рисунок 6.6е).

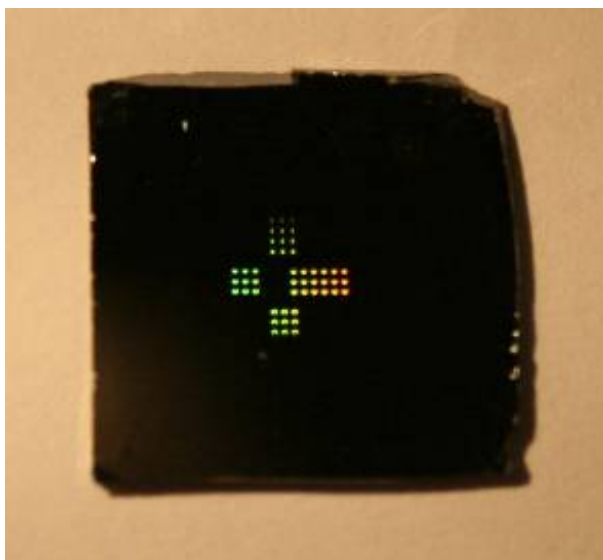


Рисунок 6.7 Фотография изготовленной маски. Появившийся цвет рисунка объясняется дифракцией света на сформированных наноструктурах.

Фотография изготовленной по этой технологии маски приведена на рисунок 6.7. Она состоит в общей сложности из 48 идентичных фрагментов, сформированных на различных участках маски. Электронно-микроскопическое изображение фрагмента приведено на рисунок 6.8.

Топология рисунка представляет собой систему полос различной ширины и высоты. Ширина изменялась от 0,14 до 20 мкм, высота – от 30 до 100 мкм. Такая структура маски решает несколько задач одновременно. Во-первых, позволяет оценить как предельное разрешение нанолитографа, до 28 нм на фоторезисте, так и сформировать полосы с максимальной шириной 4 мкм, что значительно ускоряет поиск плоскости изображения проекционного объектива.

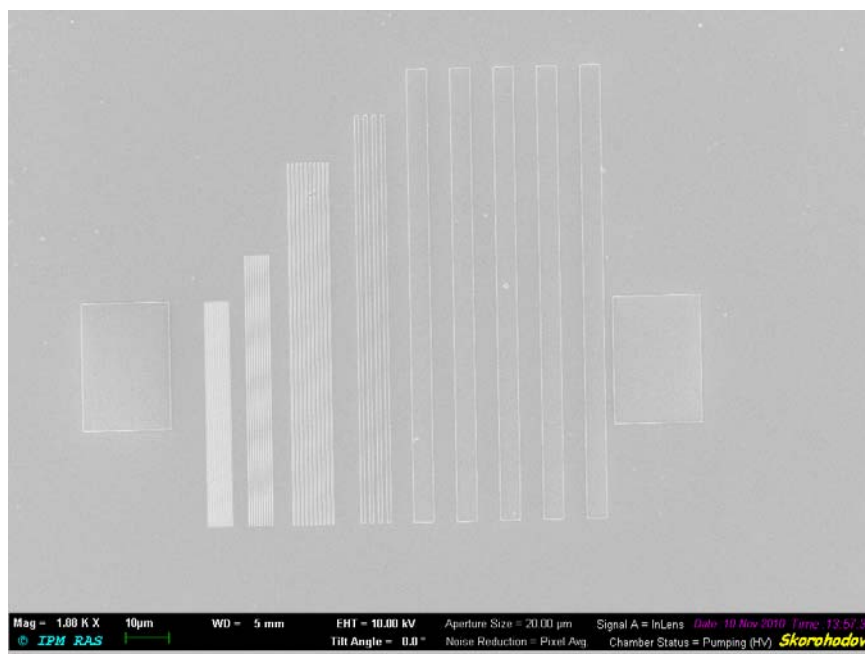


Рисунок 6.8 Электронно-микроскопическое изображение фрагмента с полосами различной ширины и высоты, который мультиплицировался по поверхности маски (в общей сложности 48 фрагментов).

Это связано с тем, что при формировании полос шириной 30 нм глубина фокуса не превышает 100 нм, в то время для структур 4 мкм, она составляет почти 10 мкм. Во-вторых, широкие полосы позволяют обнаружить наличие наноструктуры с помощью оптического микроскопа, а их высота, даже идентифицировать их ширину. После обнаружения рельефа в фоторезисте в оптическом микроскопе, образец будет изучаться уже более сложными методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии. В-третьих, искажение изображения фрагментов, расположенных в различных областях маски позволит оценить поле зрения проекционного объектива, т.е. ту область маски, которая изображается с помощью объектива без искажений. Это так же позволит сопрячь (отъюстировать) плоскости маски и пластины с фоторезистом.

После изготовления маски изучались ее основные характеристики: спектральная зависимость коэффициента отражения излучения в окрестности рабочей длины волны 13,5 нм, толщина танталового слоя и шероховатость краев линий различной ширины. Коэффициенты отражения маски в ЭУФ диапазоне измерялись на лабораторном рефлектометре, оснащённом решеточным монохроматором скользящего падения (спектральная ширина зондирующего пучка на полувысоте составляла 0,03 нм) [21]. На рисунке 6.9 приведены измеренные спектральные зависимости коэффициентов отражения от маски, измеренные при угле падения 8° (рабочий угол в нанолитографе) в окрестности длины волны 13,5 нм.

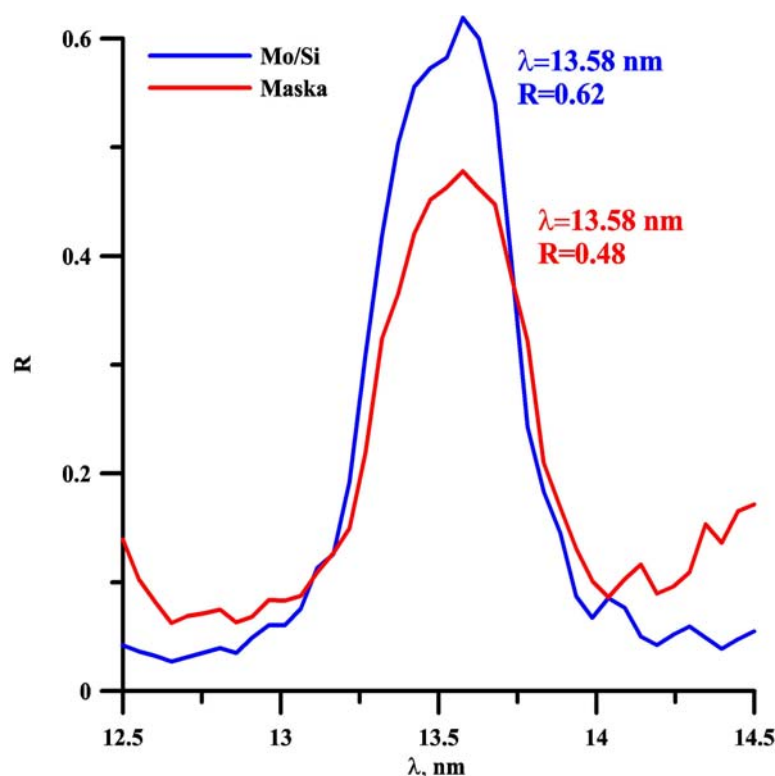


Рисунок 6.9 Спектральные зависимости коэффициентов отражения от маски, измеренные при угле падения 8° (рабочий угол в нанолитографе) в окрестности длины волны 13,5 нм. Верхняя кривая соответствует месту на маске, где отсутствует рисунок, нижняя – с рисунком.

Верхняя кривая соответствует месту на маске, где отсутствует рисунок, нижняя – с рисунком. Потери коэффициента отражения во втором случае связаны с тем, что часть зондового пучка попадает на свободную, а часть на закрытую танталом поверхность Mo/Si зеркала.

Толщина слоя-поглотителя измерялась с помощью атомно-силового микроскопа и составила 80 нм, что близко к расчетному значению.

На рисунках 6.10, 6.11 слева приведены электронно-микроскопические изображения фрагментов маски с полосами шириной 140 и 500 нм. Справа даны восстановленные по этим изображениям профили краев линий. Корень квадратный из среднеквадратического отклонения профилей от линий составил $LER \approx 8-9$ нм для обеих ширин. Таким образом, разработанная технология позволяет изготавливать тестовые маски с шириной полос до 100 нм и шероховатостью края $LER \approx 8-9$ нм, что с учетом уменьшения проекционной схемы $\times 5$ полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к маскам для проекционной ЭУФ литографии.

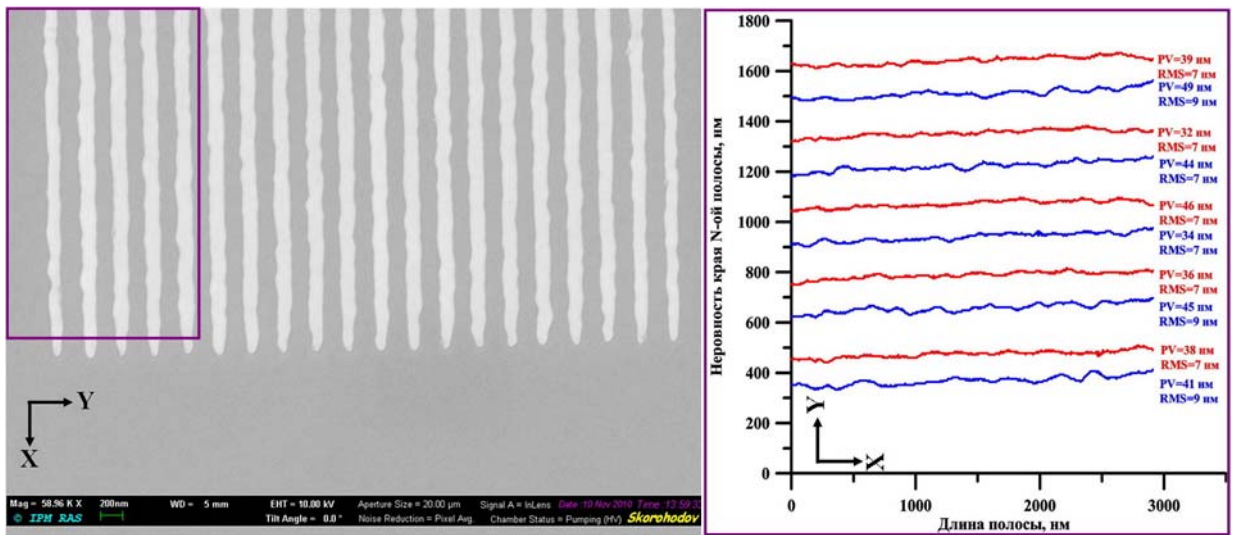


Рисунок 6.10 Электронно-микроскопическое изображение фрагмента маски с полосами шириной 140 нм. $LER=8-9$ нм.

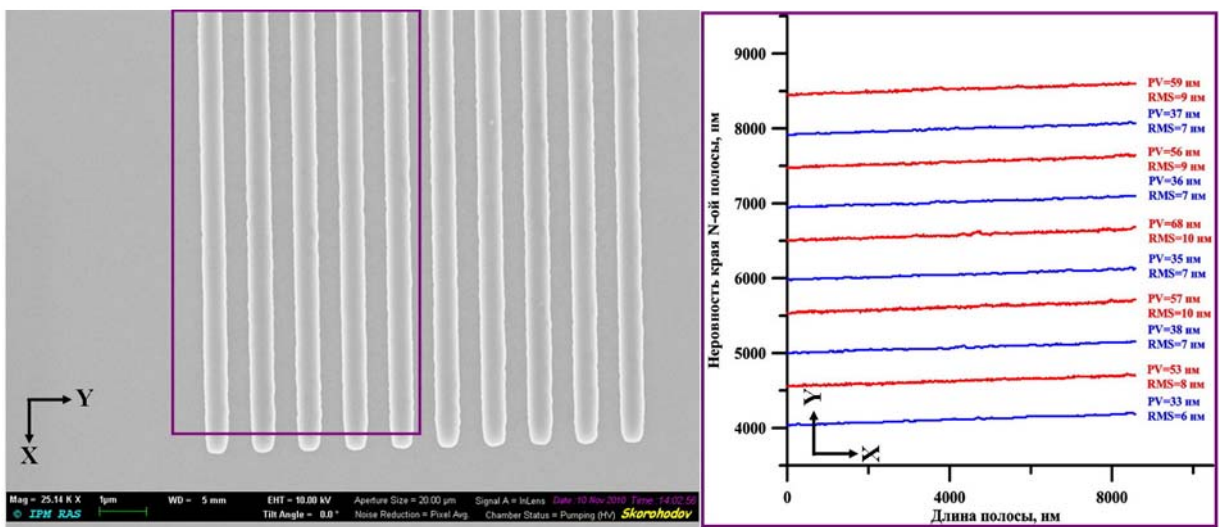


Рисунок 6.11 Электронно-микроскопическое изображение фрагмента маски с полосами шириной 500 нм. $LER=8-9$ нм.

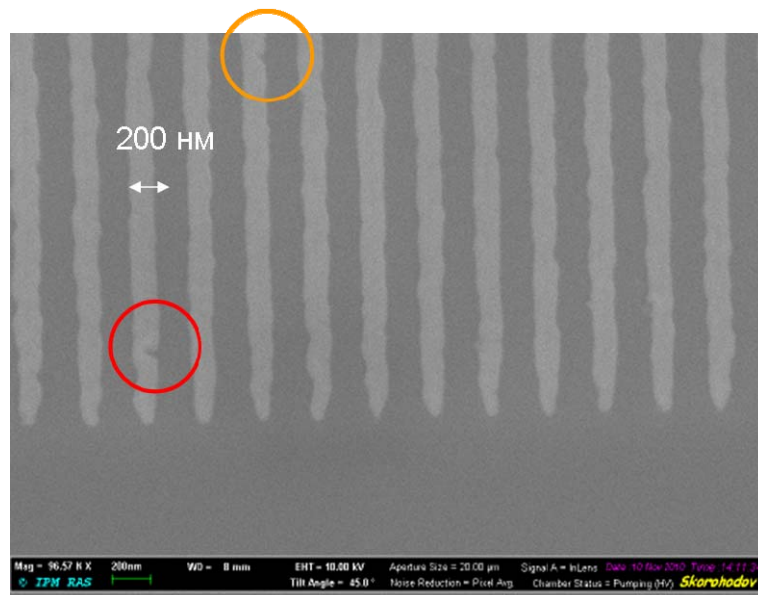


Рисунок 6.12 Электронно-микроскопическое изображение фрагмента маски с полосами шириной 140 нм. Кругжками отмечены «критические» дефекты.

Наиболее сложно выполнимым требованием к маскам для ЭУФ литографии является допустимый уровень дефектов, который не должен превышать 1 дефекта с размером более 30 нм на площади 300 см^2 . На рисунке 6.12 кругжками отмечены подобные дефекты для созданной в рамках данной работы маски. Как видно из рисунка, их плотность существенно выше, тем не менее, они не помешают проведению экспериментов по формированию наноструктур методом проекционной ЭУФ литографии, в частности изучению пространственного разрешения фоторезистов, совместной разработки ИФМ РАН и Института химии при ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород [22].

В настоящее время проблема дефектности масок является ключевой для практической ЭУФ литографии. Причем, из-за того, что в отражении участвует многослойная структура, то дефекты могут быть как поверхностными, так и объемными. Поверхностные дефекты могут быть обнаружены традиционными методами, вплоть до рассеяния света (в случае mask-blank, представляющей собой заготовку - многослойное зеркало с необходимыми барьерными слоями, предназначенное для формирования на его поверхности топологии микросхемы). Однако объемные дефекты, например, локальные нарушения интерференционной структуры, связанные с наличием нанометровых кластеров внутри структуры, далеко не всегда могут быть обнаружены методами атомно-силовой или электронной микроскопии.

Данная проблема может быть решена с помощью ЭУФ (рентгеновского) микроскопа, работающего «на отражение». На рисунке 6.13 приведена оптическая схема прибора, позволяющего решить данную проблему.

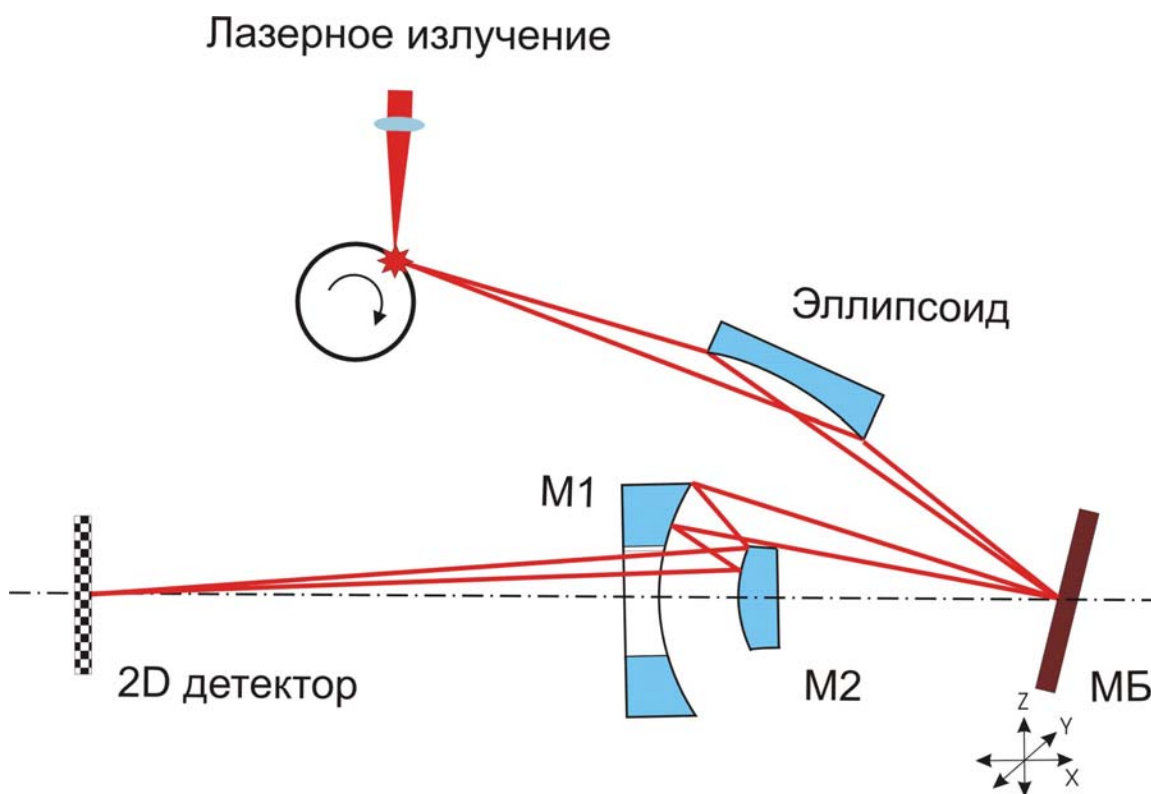


Рисунок 6.13 Оптическая схема ЭУФ (рентгеновского) микроскопа для инспекции дефектов масок.

В качестве источника ЭУФ (мягкого рентгеновского) излучения используется плазма, возникающая в результате воздействия сильно сфокусированного лазерного импульса на твердотельную мишень. Плотность мощности лазерного импульса на мишени должна составлять $\sim 10^{11}$ Вт/см². Излучение с помощью коллектора фокусируется на исследуемой маске. Угловые и пространственные характеристики пробного пучка должны быть согласованы с параметрами проекционной схемы. В данном случае в качестве проекционной схемы используется объектив Шварцшильда, образованный двумя зеркалами M1 (вогнутое) и M2 (выпуклое), с нанесенными на их поверхность многослойными отражающими структурами. Отраженное от маски излучение собирается на 2-х координатном детекторе. Если детектор помещен в плоскость изображения, то на нем регистрируется изображение маски.

Для достижения пространственного разрешения 30 нм на рабочей длине волны микроскопа 13,5 нм, числовая апертура объектива должна быть на уровне $NA=0,3$.

Проблемы изготовления и возможности достижения требуемого пространственного разрешения с помощью зеркальных объективов подробно анализируются в [23].

Для построения изображений можно использовать и зонные пластинки Френеля, однако зеркальная оптика предпочтительнее не только по эффективности отражения, но и из-за большего поля зрения при использовании асферической оптики. Последнее очень важно, так как на практике необходимо учитывать и производительность процесса дефектоскопии, поскольку маски имеют довольно большие, $\approx 200 \text{ см}^2$, площади.

Необходимо отметить и тот факт, что микроскопия дефектов «на отражение» является «прямым» методом, т.к. изучается отражение излучения с рабочей длиной волны от маски в условиях, идентичных тем, что будут в нанолитографе.

Таким образом, основными результатами данной работы стали:

1. Впервые в России разработана технология и создана отражательная маска с многослойным покрытием, позволяющая изучать пространственное разрешение фоторезистов и решать другие задачи, связанные с формированием наноструктур методом проекционной ЭУФ литографии с разрешением вплоть до 27 нм (при коэффициенте уменьшения проекционной схемы $\times 5$).
2. Предложен новый «прямой» метод диагностики дефектов масок для ЭУФ и мягкой рентгеновской литографии, основанный на регистрации изображения маски с помощью микроскопа, работающего в режиме отражения излучения от исследуемого образца на рабочей длине волны. Метод обеспечивает требуемое, на уровне 30 нм и менее пространственное разрешение, высокую производительность процесса дефектоскопии, локализацию дефектов на поверхности маски и характеризацию степени их влияния на интенсивность отраженного от них излучения, чувствителен как к поверхностным, так и объемным дефектам.

6.3 Система освещения маски ЭУФ нанолитографа

6.3.1 Введение

Оптическую схему нанолитографа с рабочей длиной волны $\lambda=13,5 \text{ нм}$ [24], который разработан в ИФМ РАН и предназначен для формирования рисунка на фоторезисте с минимальными размерами до 30 нм, можно разделить на две основные части: осветительную и проекционную. С помощью осветительной части происходит сбор ЭУФ излучения из источника и формирование на маске пятна с П-образным распределением интенсивности, с размером, совпадающим с полем зрения проекционного объектива, и с

набором углов, захватываемым объективом. Изображение рисунка на маске с уменьшением в 5 раз проецируется на пластину с фоторезистом с помощью двухзеркального объектива Шварцшильда. Данная работа посвящена осветительной части. Проекционная часть и источник излучения подробно описаны в [25,26].

6.3.2 Описание системы освещения маски ЭУФ нанолитографа

Осветительная система маски нанолитографа состоит из источника ЭУФ излучения (в нашем случае, разборная рентгеновская трубка с кремниевой мишенью), коллектора, представляющего собой сферическое зеркало с отражающим покрытием Mo/Si и собирающего излучение источника из телесного угла 1 стерадиан, и составного зеркала (гомогенизатора), обеспечивающего равномерное распределение интенсивности излучения на маске в области $3 \times 3 \text{ мм}^2$ и сохранение соответствия угла освещения входной числовой апертуре проекционного объектива. На рисунке 6.14а представлена оптическая схема осветителя с основными размерами.

На рисунке 6.14 б показана структура пучка лучей, падающего на составное зеркало в увеличенном масштабе. Для того, чтобы отраженные пучки не выходили бы за пределы телесного угла, ограниченного поверхностью данного зеркала, с центром схождения лучей на расстоянии 150 мм, где должна располагаться маска (см. рисунок 6.14 а), необходимо, чтобы профиль отражающей поверхности был либо асферическим, либо изломанным в соответствии с нелинейностью распределения лучей в пучке.

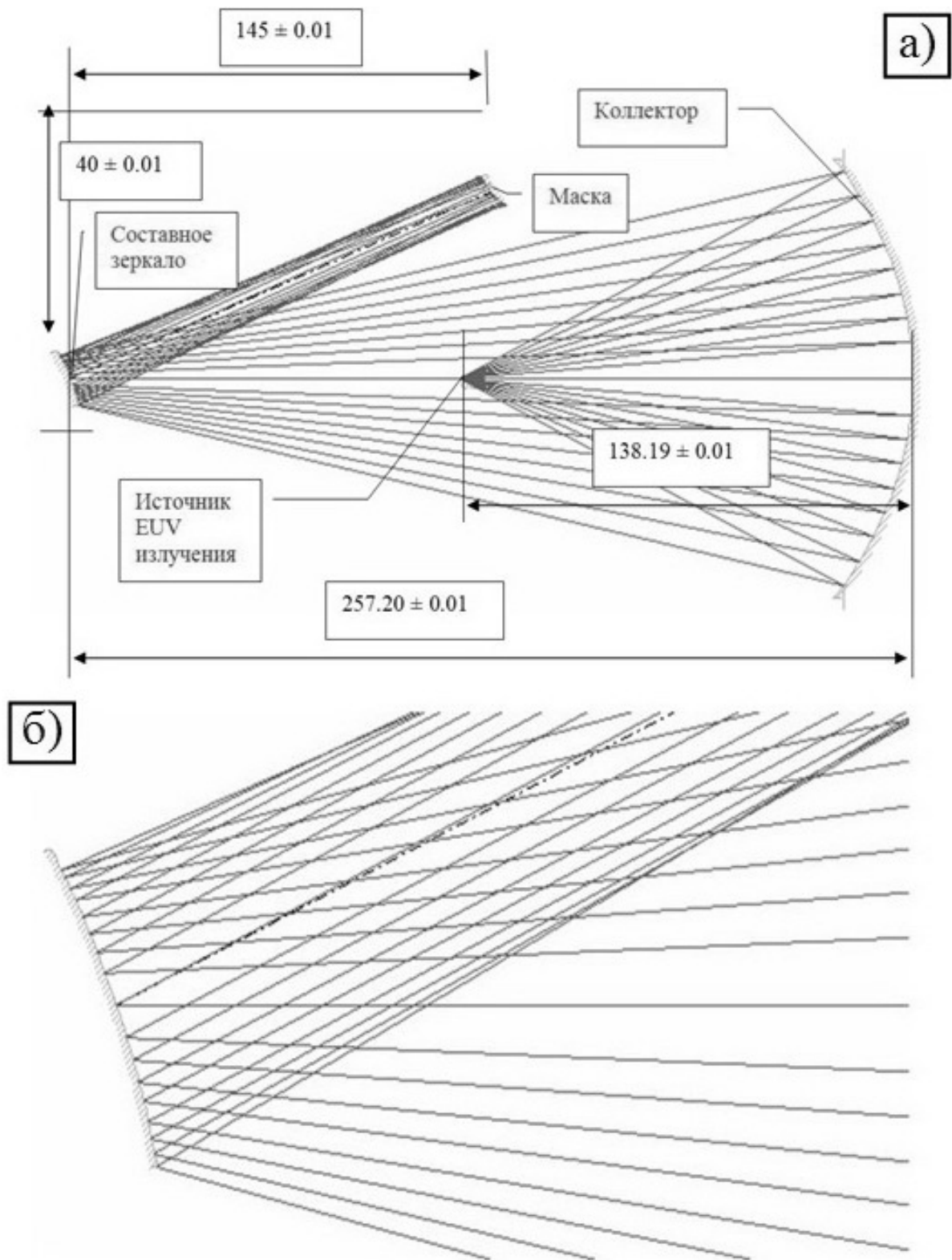


Рисунок 6.14 а) Оптическая схема осветителя; б) Структура пучка лучей, падающего на составное зеркало (составное зеркало условно показано в виде профиля сферической поверхности).

Гомогенизатор, схема которого показана на рисунке 6.15, состоит из 25 частей – минизеркал, представляющих собой выпуклые сферические поверхности.

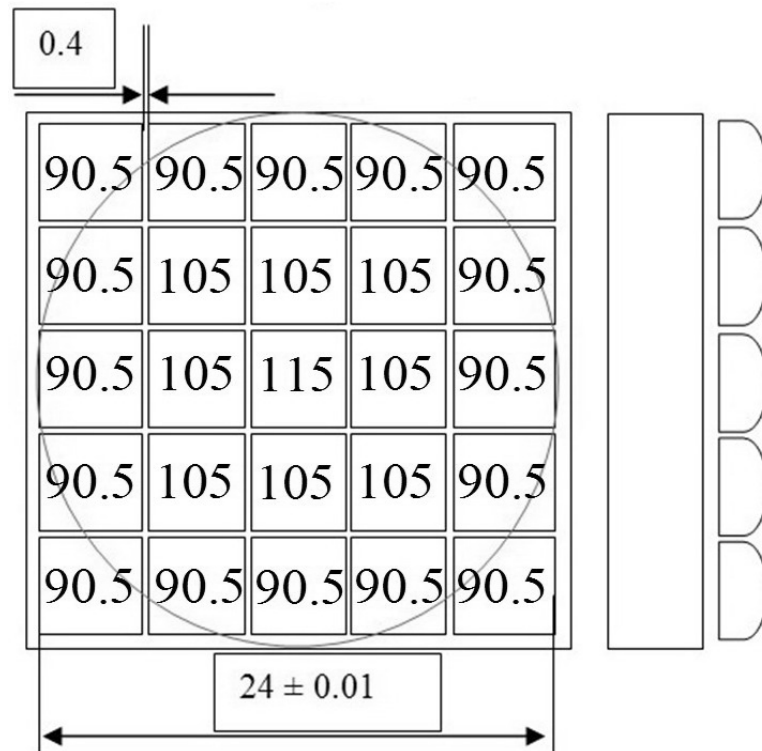


Рисунок 6.15 Составное зеркало с 25-ю минизеркалами. Окружность показывает область сосредоточения $\sim 100\%$ световой энергии, идущей от коллектора.

Для определения оптимальных значений радиусов, сборки и точной настройки каждого минизеркала индивидуально был произведен численный расчет оптической схемы с помощью программы ZEMAX. Изначально в качестве источника выступал точечный источник, сферический фронт от которого отражался от коллектора и падал на гомогенизатор. Если каждый элемент гомогенизатора расположить таким образом, чтобы центральные нормали были параллельны друг другу, то изображения от элементов не соберутся на маске в заданной области, а будут разбросаны по площади размером 80×80 мм², что показано на рисунке 6.16 а. Для того чтобы собрать отраженный свет, минизеркала гомогенизатора должны быть наклонены по отношению к центральному на определенный угол. Результаты численного расчета показаны на рисунке 6.16 б. В таблице 6.2 приведены углы падения света $\Theta_{\text{пад}}$ на минизеркала по отношению к нормали.

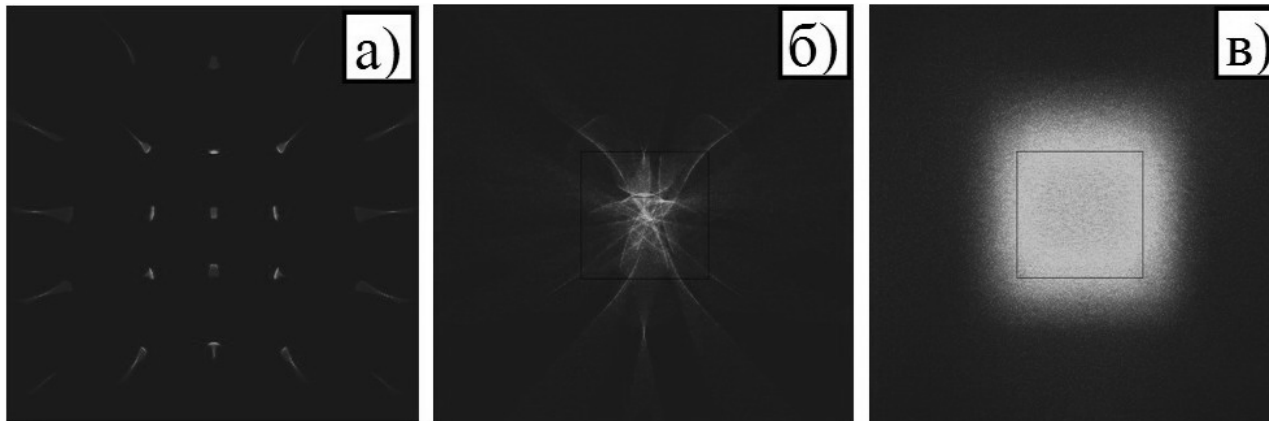


Рисунок 6.16 Изображение на маске: а) – центральные нормали минизеркал параллельны; б) и в) – минизеркала нужным образом съюстированы (размер источника для случая в) – $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$).

Таблица 6.2 Углы падения света $\Theta_{\text{пад}}$ на минизеркала по отношению к нормали

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

Из рисунка видно, что свет собирается в области $3 \times 3 \text{ мм}^2$, но изображение не равномерно засвечивает данную область. Если мы зададим реальные размеры источника, $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$, с распределением интенсивности относительно оси системы, совпадающим с угловой зависимостью выхода флуоресцентного излучения SiLa при возбуждении электронным пучком [27], то мы получим изображение на маске, показанное на рисунке 6.16в. Такое распределение интенсивности засветки полностью удовлетворяет требованиям. После того как были найдены углы падения на минизеркала, для каждого из них были рассчитаны значения периодов Mo/Si многослойных отражающих покрытий $d_{\text{опт}}$ (см. таблицу 6.2), находящиеся в резонансе с длиной волны 13,5 нм. После этого подложки разделялись по группам с близкими значениями периодов, и каждая группа напылялась отдельно. Напыление Mo/Si структур производилось методом магнетронного распыления. Подробнее об установке и условиях роста можно найти в [20]. После напыления у каждого минизеркала изучались отражательные характеристики. В случае, если период зеркала не попадал в заданный $\pm 1,5\%$ интервал, покрытие стравливалось и, после соответствующей коррекции технологического процесса, производилось повторное напыление.

При аттестации отражательных характеристик выпуклых минизеркал, особенно с маленькими радиусами кривизны, существует проблема с определением абсолютного значения коэффициента отражения. Это связано с тем, что пучок, отраженный от исследуемого зеркала, расширяется, и часть его не попадает в щель детектора. Поэтому измеренные значения коэффициента отражения, рисунок 6.17 нижняя кривая, оказываются заниженными. Для уверенности, что коэффициент отражения удовлетворяет требованиям, одновременно со сферическими зеркалами напыляется плоское зеркало-свидетель, располагаемое на той же высоте, что и напыляемый образец. Верхняя кривая соответствует отражению от свидетеля. Как видно, коэффициент отражения в окрестности длины волны 13,5 нм составляет $R=67,5\%$, что соответствует мировому уровню.

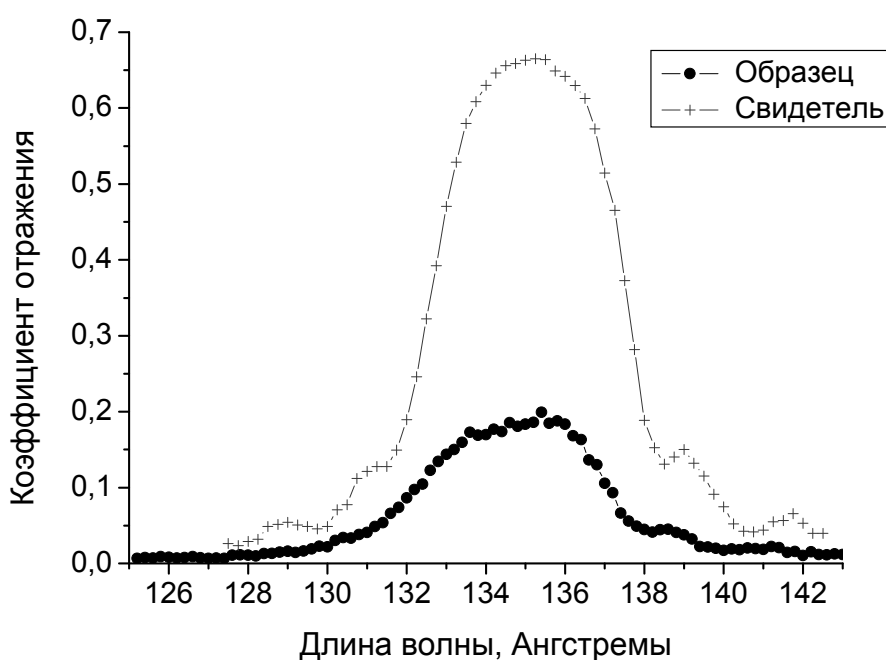


Рисунок 6.17 Коэффициенты отражения минизеркал (образец) и плоского зеркала-свидетеля в окрестности длины волны $\lambda=13,5$ нм.

На основе проделанных расчетов был разработан стенд, позволяющий юстировать каждый элемент составного зеркала. Фотография стенда показана на рисунке 6.18. В данном эксперименте в качестве источника использовалось одномодовое оптическое волокно с зауженной до 0,25 мкм выходной апертурой и который, по сравнению с характерными размерами оптической системы, можно считать точечным. Последнее позволяет производить сравнение экспериментальных данных с данными, полученными в ходе расчета с помощью программы ZEMAX. Принципиальная схема эксперимента и расположение минизеркал гомогенизатора показаны на рисунке 6.19. На рисунке 6.20

представлены изображения от минизеркал №13, №14, №17 и №18, а также представлена суммарная картина. Результаты, полученные экспериментально, хорошо согласуются с численными расчетами. После установки и юстировки минизеркал в рабочее положение они фиксировались в этом положении с помощью эпоксидного клея.

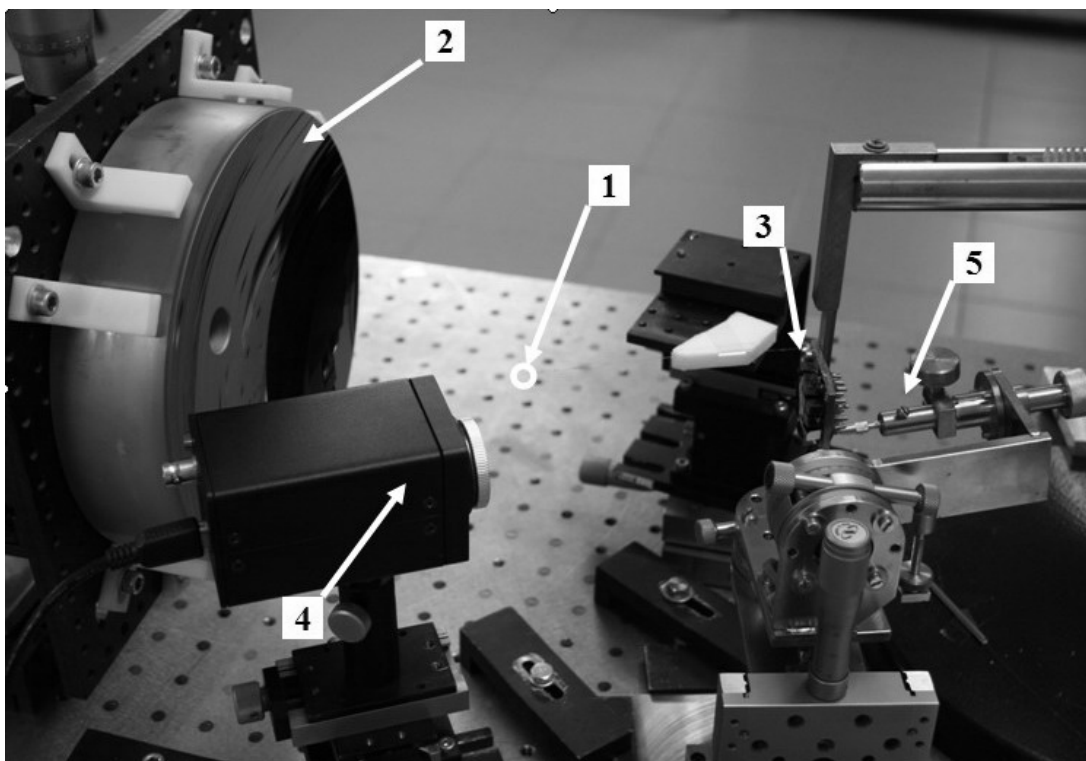


Рисунок 6.18 Фотография стенда осветительной части нанолитографа на котором производится сборка гомогенизатора. 1 – волоконный источник сферической волны, 2 – коллектор, 3 – гомогенизатор, 4 – камера, 5 – механизм для юстировки минизеркал гомогенизатора.

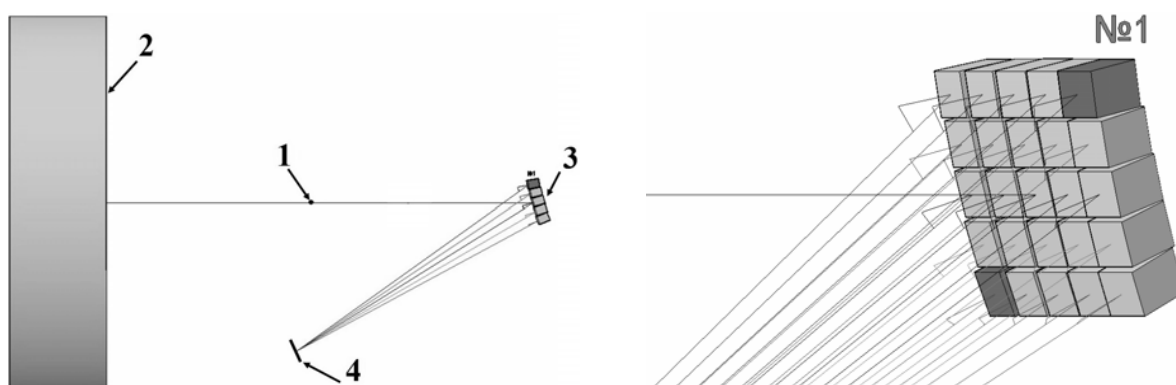


Рисунок 6.19 Схема осветительной части нанолитографа и расположение минизеркал гомогенизатора. 1 – источник сферической волны, 2 – коллектор, 3 – гомогенизатор, 4 – экран.

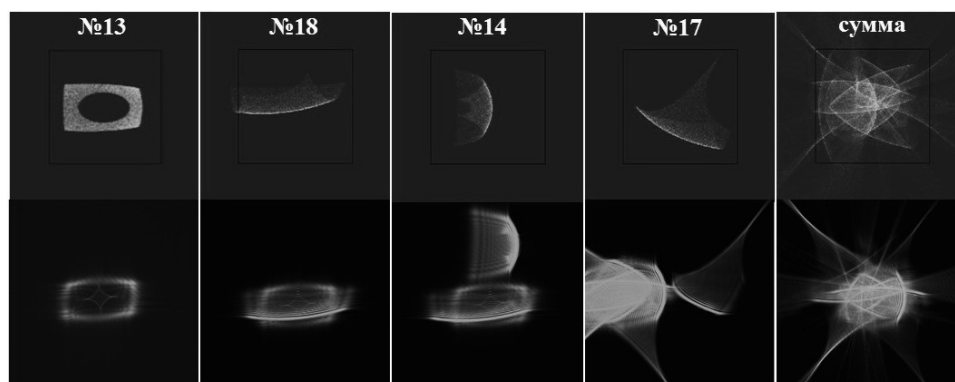


Рисунок 6.20 Изображения от отдельных минизеркал гомогенизатора и суммарное (сверху – расчет с помощью программы ZEMAX, снизу – экспериментальные результаты).

В настоящее время осветительная система установлена в нанолитограф.

6.3.3 Выводы

Предложена система освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм. Основными элементами данной системы являются источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, сферическое зеркало-коллектор и составное зеркало (гомогенизатор), которое состоит из 25 минизеркал и обеспечивает равномерную засветку требуемой области на маске. Численные расчеты изображения достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, запланированные на этап 2 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.

Выполнены научные исследования и работы по развитию Центра коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» (ЦКП ИФМ РАН).

Созданы новые методики исследования структур с δ -слоями и изготовленных на их основе низкобарьерных диодов (методика оценки параметров низкобарьерных диодов, основанная на обработке температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик и методика прямого определения глубины залегания расположенных близко к поверхности δ -слоев при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5). С их помощью выполнены экспериментальные исследования тестовых структур.

Разработана Программа развития ЦКП ИФМ РАН. Выполнены исследования в интересах сторонних организаций. Разработаны новые методики исследований и виды услуг, обновлен Перечень услуг ЦКП ИФМ РАН. Закупленное в рамках темы спецоборудование прошло этап пуско-наладочных работ и успешно введено в эксплуатацию.

Выполнены разработки по системе радиовидения 3-мм диапазона длин волн и работы в области рентгеновской литографии. Предложена структурная схема и произведён выбор основных узлов быстродействующей цифровой системы регистрации данных с матрицы планарных детекторов размерностью 8x8 элементов. Предложенная система является удобной для передачи, предварительной обработки, хранения и визуализации радиоизображений. В области рентгеновской литографии выполнены работы по отражательной маске и системе освещения маски ЭУФ нанолитографа на рабочей длине волны $\lambda=13,5$ нм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Tao M., Agarwal S., Udeshi D. et al Low Schottky barriers on n-type silicon (001) // *Appl.Phys.Lett.* - 2003. - V.83. - N.13. - P.2593.
- 2 Zhao Q.T., Breuer U., Rije E. et al Tuning of NiSi/Si Schottky barrier heights by sulfur segregation during Ni silicidation // *Appl.Phys.Lett.* - 2005. - V.86. - N.6. - P.062108.
- 3 Shannon J.M. Reducing the effective height of a Schottky barrier using low-energy ion implantation // *Appl.Phys.Lett.* - 1974. - V.24. - N.8.- P.369.
- 4 Fay P., Schulman J.N., Thomas S. et al High-performance antimonide-based heterostructure backward diodes for millimeter-wave detection // *IEEE Electron Device Lett.* - 2002. - V.23. - N.10. - P.585.
- 5 Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C. Tunable all epitaxial semimetal-semiconductor Schottky diode system: ErAs on InAlGaAs // *J. Vac. Sci. Technol.* - 2005. - V.23. - N.5. - P.1929.
- 6 Sassen S., Witzigmann B., Wolk C., Brugger H. Barrier height engineering on GaAs THz Schottky diodes by means of high-low doping, InGaAs- and InGaP-layers // *IEEE Trans. Electron Devices.* - 2000. - V.47. - N.1. - P.24.
- 7 Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью delta -легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs // *ФТП*, - 2002. - Т.36, - №5. - С.537.
- 8 Shashkin V.I., Drjagin Y.A., Zakamov V.R. et al Millimeter-wave detectors based on antenna-coupled low-barrier Schottky diodes // *Int. J. Infrared Milli. Waves.* - 2007. - V.11. - N.11. - P.945.
- 9 Закамов В.Р., Мурель А.В., Шашкин В.И. Матричный детекторный приёмник плотной компоновки для систем видения миллиметрового диапазона длин волн // *Контроль. Диагностика*, - 2009. - №.5. - С.15.
- 10 Шашкин В.И., Мурель А.В. Обобщенная теория токопереноса в низкобарьерных диодах Мотта с приповерхностным дельта-легированием: сопоставление с экспериментом // *Микроэлектроника*, - 2010. - Т. 9. - №5. - С. 348.
- 11 Kelly M. J. The engineering of quantum-dot devices // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* – 2003. - V.361. - P.393.
- 12 Шашкин В.И., Мурель А.В. Диагностика низкобарьерных диодов Шоттки с приповерхностным δ -легированием// *ФТП*, - 2008. - Т.42, - №4. - С.500.
- 13 Hofmann, S. Sputter depth profile analysis of interfaces // *Rep. Prog. Phys.* - 1998. - V. 61, - P. 827-888.

- 14 Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Лобанов Д.Н. и др. Использование кластерных вторичных ионов Ge_2^- , Ge_3^- для повышения разрешения по глубине при послойном элементном анализе полупроводниковых гетероструктур GeSi/Si методом ВИМС // ФТП. - 2010. - Т. 44. - № 3. - С. 418-421.
- 15 Di Li, Yang Cheng, Geng Wang et. al. Convolution/Deconvolution Package on Accurate Modeling of the Recoil Mixing Effect in SIMS, User's manual. Austin: University of Texas, - 2000. 12 p.
- 16 В.И. Шашкин, Н.В. Востоков, А.В. Мурель. Барьерные и инжекционные механизмы нелинейности тока в детекторных диодах Мотта // Материалы XIII Симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 16–20 марта 2009 г., с.167-168..
- 17 Ch. Wagner, N. Harned. EUV lithography: lithography gets extreme // Nature Photonics, - 2010, - V.4. - P. 24.
- 18 Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов и др. Стенд проекционного ЭУФ-наноитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм // Известия РАН. Серия физическая. - 2011. - Том 75, - №1. - С. 54-56.
- 19 WEB источник: http://henke.lbl.gov/optical_constants/
- 20 S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin et al. Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications Central European Journal of Physics. - 2003. - V. 1. - P. 191-209.
- 21 М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев и др. Рефлектометр с модернизированной оптической схемой для исследования элементов рештеноогтики в диапазоне 0,6-20 им // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - №2. - С. 23-27.
- 22 С.А. Булгакова, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин и др. Рентгенорезисты на основе ПММА для спектрального диапазона 13нм // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, - 1999, - №1. - С.133.
- 23 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: <http://sciyo.com/articles/show/title/manufacturing-and-investigating-objective-lens-for-ultrahigh-resolution-lithography-facilities>.
- 24 Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, А.Б. Закалов и др. Стенд проекционного ЭУФ-наноитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм // Труды 14-го

- международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта - 2010, - Т. 1. - С. 193.
- 25 С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко и др. Двухзеркальный проекционный объектив нанолитографа на $\lambda = 13,5$ нм // Труды 14-го международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника» / ИФМ РАН. – Н. Новгород, 15-19 марта - 2010, - Т. 1. - С. 195.
- 26 И.Г. Забродин, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов и др. Разборные рентгеновские трубки для исследований в диапазоне длин волн 0,6-20 нм / Материалы совещания «Рентгеновская оптика - 2008», Черногoловка, Россия, 6-9 октября 2008. - С.44-46.
- 27 А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало. Моделирование интенсивности излучения рентгеновских трубок в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне. // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С.218-220.

Приложение А

к отчету о НИР «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 нанопотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа развития ЦКП ИФМ РАН

РАЗВИТИЕ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ:

- ✓ ввод в эксплуатацию новых приборов ЦКП (электронный микроскоп LIBRA 200 MC, рентгеновский дифрактометр Bruker D8 Discovery, профилометр модели 130, лазерный генератор микроизображений μ PG101);
- ✓ маркетинговые исследования по вновь приобретаемому оборудованию в рамках ГК7007;
- ✓ участие в конкурсах по мероприятию 5.2 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» для приобретения нового оборудования;
- ✓ использование дополнительных источников финансирования для расширения приборного парка ЦКП (финансирование по темам ИФМ РАН, целевое финансирование РАН, целевое финансирование РФФИ);
- ✓ разработка новых приборов и их изготовление в мастерских ИФМ РАН (комплект приборов для исследования шероховатости поверхностей в широком диапазоне пространственных частот);
- ✓ разработка краткосрочных и долгосрочных планов новых закупок;
- ✓ текущее обслуживание всего комплекса оборудования ЦКП, включая закупку комплектующих и ремонтные работы.

ОСВОЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДИК И РАСШИРЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ ОКАЗЫВАЕМЫХ УСЛУГ

- ✓ освоение методик из базового обеспечения нового электронного микроскопа LIBRA 200 MC;
- ✓ освоение методик из базового обеспечения нового рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discovery;
- ✓ освоение методик из базового обеспечения нового профилометра модели 130;

- ✓ разработка новых методик;
- ✓ исследования в области метрологии измерений;
- ✓ дополнение Перечня услуг новыми методиками.

СЕРТИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИК ЦКП

- ✓ приобретение оборудования, включенного в Реестр измерительных средств России;
- ✓ метрологическая поверка оборудования;
- ✓ аттестация методик измерений.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЯВОК ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ:

- ✓ разработка удобных для пользователей форм договора на услуги;
- ✓ разработка форм долгосрочного взаимодействия с пользователями;
- ✓ обеспечение возможности подачи заявки в электронном виде;
- ✓ разработка и внедрение лабораторных информационно-управляющих систем.

РАБОТЫ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ПОЛЕЗНОЙ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЦКП

- ✓ стимулирование участия сотрудников ИФМ РАН в работе ЦКП;
- ✓ оптимизация форм предоставления услуг, в частности, расширение прямого доступа к приборам для сотрудников ИФМ РАН, аспирантов и дипломников.

РАБОТЫ ПО РАСШИРЕНИЮ КРУГА ОРГАНИЗАЦИЙ-ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ УСЛУГ ЦКП

- ✓ анализ и выявление потребностей организаций;
- ✓ заключение долгосрочных договоров с постоянными пользователями услуг;
- ✓ оказание небольших по объему услуг новым пользователям на безвозмездной основе;
- ✓ проведение лабораторных работ для студентов и аспирантов на оборудовании ЦКП (в частности, сюда входит "практикум по физике полупроводников" студентов образованной на базе ИФМ РАН кафедры "Физика наноструктур и наноэлектроника" Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского);
- ✓ разработка новых лабораторных работ на оборудовании ЦКП;
- ✓ проведение обучения представителей организаций пользователей работе на оборудовании ЦКП;
- ✓ проведение ЦКП семинаров и консультаций;

- ✓ участие представителей ЦКП в совещаниях, конференциях и других публичных мероприятиях с целью популяризации ЦКП. Участие с докладами в работе научных конференций, публикация результатов в периодических научных изданиях.

РАЗМЕЩЕНИЕ СВЕДЕНИЙ О ЦКП В ИНТЕРНЕТЕ И СРЕДСТВАХ МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

- ✓ поддержание и обновление интернет-сайта ЦКП ИФМ РАН;
- ✓ предоставление сведений о ЦКП для размещения на едином интернет-портале российских ЦКП;
- ✓ освещение в средствах массовой информации сведений о ЦКП.

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



В.И. Шашкин

«25» ноября 2011 г.

Приложение Б

к отчету о НИР «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 нанofотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перечень организаций – заказчиков исследований в ЦКП ИФМ РАН

На этапе 2 новыми организациями – заказчиками были:

1. ООО «Ионные источники и технологии»

Договор на услуги 07.11.11. №922/140. Акт сдачи-приемки от 09.11.11

2. Институт химии высокочистых веществ РАН

Договор от 03.10.2011. №261/140. Акт сдачи-приемки от 14.11.2011

3. Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Письмо от 01.09.2011. №16141/1117. Акт от 10.10.2011

4. Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

Письмо от 05.09.2011. №135-4/1880. Акт о выполнении услуг от 08.11.2011

5. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

Письмо от 14.09.2011. № К-18/2-4. Акт о выполнении услуг от 17.11.2011

6. ООО НПП «ТЭОС»

Письмо от 07.11.2011. №27. Акт о выполнении услуг от 15.11.2011

7. Институт металлоорганической химии РАН

Письмо от 08.11.2011. №12115-07-2115/569. Акт о выполнении услуг от 15.11.2011

8. НГТУ им. Р.И. Алексеева

Письмо от 18.11.2011. №23.4-01.10/145. Акт о выполнении услуг от 24.11.2011

9. ИФП СО РАН

Письмо от 15.11.2011. №15307-35-9217. Акт о выполнении услуг от 05.12.2011

На этапе 1 организациями – заказчиками были:

10. ОАО «КБ «Икар», Нижний Новгород

Договор от 03.03.2011 № 244/140

11. Центр фотохимии РАН

Госконтракт от 01.07.2009 № 02.527.11.009 – ИФМ-09

12. ФГУП «ННИПИ Кварц», Нижний Новгород

Договор от 10.03.2011 №148-Н/11-246/120

13. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Нижний Новгород
Договор от 01.04.2011 №245/140/34-251

14. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики,
МИРЭА

Договор от 01.04.2011 №221/150

15. ОАО «АКБЭЛ», Нижний Новгород
Письмо от 02.09.2011 №38

16. ИПФ РАН, Нижний Новгород
Письмо от 01.09.2011 №11226-370/2137

17. НИФТИ при ННГУ Нижний Новгород
Письмо от 09.09.2011 №352-15

Всего за 2011 год – 17 организаций

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



В.И. Шашкин
В.И. Шашкин

«25» ноября 2011 г.

Приложение В

к отчету о НИР «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». Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Справка о метрологическом обеспечении измерений ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»

В соответствии с годовыми планами ИФМ РАН постоянно проводится поверка приборов ЦКП ИФМ РАН в лабораториях Госстандарта. Это приборы измерения электрических величин, давления и дозиметрической аппаратуры рентгеновского диапазона.

Закупается современное аналитическое оборудование, сертифицированное фирмами-изготовителями. Оборудование идет в комплекте с набором методик и программным обеспечением. Из ранее закупленного сюда относятся, в частности, дифрактометры рентгеновские Philips X'Pert PRO MRD (Philips), аналитический электронный микроскоп JEM 2000EXII (JEOL), сканирующий электронный микроскоп Supra 50VP (Karl Zess), комплекс сканирующих зондовых микроскопов "Solver" (NT-MDT), комплекс фурье-спектроскопии высокого разрешения на основе BOMEM DA3.36, Фурье-спектрометр Vertex 80V (BRUKER OPTIC), комплект для СВЧ-измерений сверхпроводников на базе оборудования фирм Agilent и Tektonix. В рамках выполнения настоящего госконтракта это уже поставленные и введенные в эксплуатацию «Профилометр модели 130» и «Микроскоп зондовый сканирующий СММ-2000» с сертификатами средства измерения, аттестованные методики и контрольные образцы к ним, которые входят в комплект "Установка исследования многослойных Si, GaAs и GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости и качества их поверхности". Аттестованные образцы могут быть в дальнейшем использованы при аттестации методик измерения на других, уже имеющихся измерительных приборах ЦКП ИФМ РАН, что обеспечит существенное продвижение ЦКП в его метрологическом обеспечении.

ЦКП ИФМ РАН начал совместные работы с Региональным отделением Центра метрологического обеспечения и оценки соответствия нанотехнологий и продукции nanoиндустрии (ЦМО) в Приволжском федеральном округе, образованного на базе Нижегородского ЦСМ. Эти работы предполагают создание новых методик и

использование оборудования ЦКП ИФМ РАН для целей метрологического обеспечения нанотехнологий в ПФО. Заключено соглашение с Нижегородским ЦСМ №13-010/Н1700 от 30.11.2011, копия Соглашения прилагается. Кроме того, начаты работы по договорному оформлению совместных работ с Научно-образовательным центром «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. Это позволит более эффективно использовать стандартные образцы и улучшит метрологическое обеспечение обоих центров.

В ЦКП ИФМ РАН постоянно ведутся работы в области метрологии по совершенствованию методов анализа с использованием оборудования ЦКП. В Отчете по НИР представлены 2 новые разработки ЦКП ИФМ РАН: методика оценки параметров низкобарьерных диодов, основанная на обработке температурных зависимостей экспериментальных вольт-амперных характеристик и методика прямого определения глубины залегания расположенных близко к поверхности δ -слоев при послойном элементном анализе структуры с использованием вторично-ионного масс-спектрометра TOF.SIMS-5.

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



В.И. Шашкин В.И. Шашкин

«25» ноября 2011 г.

Приложение Г

к отчету о НИР «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». Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перечень сертифицированного оборудования. Перечень аттестованных методик ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур»

Сертификаты фирм-изготовителей имеют следующие приборы:

1. Дифрактометр рентгеновский Philips X'Pert PRO MRD Philips Нидерланды 2002.
2. Аналитический электронный микроскоп JEM 2000EXII JEOL Япония 1989.
3. Комплекс сканирующих зондовых микроскопов "Solver" в составе микроскопов: "Solver-P47", "Smena", "Solver P7LS" Компания НТ-МДТ, Зеленоград. Россия 1998, 2001, 2004.
4. Комплект для СВЧ-измерений, покомпонентно: Анализатор спектра Agilent E4407B, Цифровой осциллограф Tektonix TDS3000B США 2004.
5. Комплекс фурье-спектроскопии высокого разрешения на основе Фурье спектрометра WOMEM DA3.36 WOMEM. (В настоящее время ABB) Канада.
6. Фурье-спектрометр Vertex 80V BRUKER OPTIC GmbH Германия.
7. Сканирующий электронный микроскоп Supra 50VP Karl Zess Германия 2005.

Действующие Свидетельства об утверждении типа средств измерения и Свидетельства о поверке имеют следующие приборы:

1. Профилометр модели 130, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство об утверждении типа средств измерения №26057, Свидетельство о поверке №203-2031.
2. Микроскоп зондовый сканирующий СММ-2000, ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ», Свидетельство об утверждении типа средств измерения №42785, Свидетельство о поверке №203-185.

В работе ЦКП используются современные методики анализа, разработанные фирмами-изготовителями аналитического оборудования и идущие в комплекте поставки оборудования.

В рамках настоящего госконтракта в комплекте поставки «Часть 1 оборудования «Высоковакуумная технологическая установка исследования многослойных Si, GaAs, GaN наноструктур методами микроскопии в процессе плазменного напыления-перепыления с контролем шероховатости поверхности» получены методики:

- 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.

Кроме того, используются разработанные в ИФМ РАН оригинальные методики, защищённые патентами РФ или опубликованные в центральной печати:

Измерение толщины прозрачных объектов

- 1 *В.В. Иванов, Е.В. Катин, В.А. Маркелов, М.А. Новиков, А.Д. Тертышник.* Интерферометрическое устройство для измерения физических параметров прозрачных слоев (варианты). Патент РФ № 2141621, приоритет от 4.02.1998.
- 2 *В.В. Иванов, Е.В. Катин, В.А. Маркелов, М.А. Новиков, А.Д. Тертышник.* Интерферометрическое устройство для бесконтактного измерения толщины. Патент РФ № 2147728, приоритет от 10.11.1998.

Измерение нелинейного отклика сверхпроводящих слоев

- 3 *Е. Е. Pestov, V. V. Kurin, Yu. N. Nozdrin,* "Third-order local nonlinear microwave response of YBa₂Cu₃O₇ and Nb thin films", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 11, 131 (2001).
- 4 *А. Yu. Aladyshkin, А. А. Andronov, Е. Е. Pestov et al.,* "Study of the Nonlinear Response of Superconductors in the Microwave Band Using a Local Technique", Radiophys. and Quant. Elect. 46, 109 (2003).

C-V профилирование

- 5 *И.Р. Каретникова, И.М. Нефёдов, В.И. Шашкин.* О точности восстановления профиля легирования полупроводников на основе вольт-фарадных измерений в процессе электрохимического травления. ФТП, 2001, т.35, в.7, с.801-807.
- 6 *V. Shashkin, I. Karetnikova, A. Murel, I. Nefedov, I. Shereshevskii.* Approach to electrochemical C-V profiling in semiconductor with sub-Debye-length resolution. IEEE Trans. On Electron. Devices, 2000, v.47, N6, p.1221-1224.
- 7 *В.И. Шашкин, И.Р. Каретникова, И.М. Нефёдов, А.В. Мурель, И.А. Шерешевский.* Простой метод восстановления тонкой структуры легирования полупроводников из C-V измерений в электрохимической ячейке, ФТП, 1997, т.31, N8, с.926-929.
- 8 *И.В. Ирин, А.В. Мурель.* Автоматизированный измерительный комплекс для электрохимического C-V профилирования. ПТЭ, 1993, №6, с.150.

Рентгенодифракционный анализ эпитаксиальных слоев и островков

- 9 *Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская.* Динамическое рассеяние рентгеновских лучей на многослойных эпитаксиальных структурах. В сб. "Физика твердого тела. Лаб. практикум. Методы получения твердых тел и исследование их структуры" под ред. проф. Хохлова А.Ф., Том 1. М., Высшая школа, 2001, с. 171-202.

- 10 Дроздов Ю.Н., Ю.Н. Сафьянов. Рентгенография высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-d}$. Там же, стр. 131-140.
- 11 Ю.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, В.М.Данильцев, О.И.Хрыкин, А.В.Новиков, В.В.Постников. Рентгенооптическая схема для дифракционного исследования полупроводниковых квантовых слоев и точек. Поверхность. РСНИ, 2000, 1, 136-139.
- 12 Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, А.В. Новиков, В.В. Постников, В.И. Шашкин. Сокращенный способ рентгеновского дифракционного сканирования обратного пространства эпитаксиальных слоев и островков. Поверхность. РСНИ, 2003, №1, с.114-118.

Послойный элементный анализ

- 13 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Полушкин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Послойный Оже-анализ сверхвысокого разрешения: проблема минимизации аппаратных погрешностей. Письма в ЖТФ, 1995, т.21, №18, с.1-7.
- 14 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Сверхвысокое разрешение при послойном Оже-анализе гетероструктур $InGaAs/GaAs$ с глубоко залегающими квантовыми ямами. Письма в ЖТФ, 1996, т.22, №18, с.61-67.
- 15 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Субнанометровое разрешение по глубине при послойном анализе с использованием скользящих Оже-электронов. Письма в ЖТФ, 2001, т.27, №3, с.59-66.
- 16 М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Новый метод определения резкости гетеропереходов $InGaAs/GaAs$ при послойном Оже-анализе. Письма в ЖТФ, 2001, т.27, №20, с.51-56.
- 17 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.А.Пряхин, В.И.Шашкин, П.Г.Сенников, Х.-Й.Поль. Количественный безэталонный анализ концентрации изотопов $^{28,29,30}Si$ в кремнии методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5. «Известия Российской Академии наук. Серия физическая». 2010. Т.74.№1.С.82-84.
- 18 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.В.Мастеров, С.А.Павлов, А.Е.Парафин, Г.Л.Пахомов. Использование кластерных первичных ионов W^{3+} для послойного анализа ВТСП пленок $YBaCuO$ методом ВИМС. «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования». 2010, №7, с.53-57.
- 19 М. Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, М. М. Барышева, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало. Использование кластерных вторичных ионов для минимизации матричных эффектов при послойном анализе многослойных наноструктур $La/B4C$ методом ВИМС. Поверхность РСНИ. вып.10, С. 14-18 (2010).
- 20 М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, Д.Н.Лобанов, А.В.Новиков, Д.В.Юрасов. Использование кластерных вторичных ионов Ge_2^- , Ge_3^- для повышения разрешения по глубине при послойном элементном анализе полупроводниковых гетероструктур $GeSi/Si$ методом ВИМС. ФТП, 44, 3, 418-421 (2010).
- 21 М.Н. Дроздов, Ю. Н. Дроздов, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, Д. В. Юрасов. Анализ чувствительности масс-спектрометра TOF. SIMS-5 к матричным элементам в слоях $GeSi$ при регистрации комплексных ионов. Поверхность РСНИ. Вып.6, С. 93-96 (2011).

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



Шашкин В.И. Шашкин

«25» ноября 2011 г.

Приложение Д

к отчету о НИР «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 нанofотоники миллиметрового и инфракрасного диапазонов длин волн». Этап 2. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Актуализированный перечень услуг ЦКП ИФМ РАН

Таблица 5.1 ЦКП ИФМ РАН

№ п/п	Наименование услуги
1.	Рентгеновский дифракционный анализ эпитаксиальных слоев
2.	Анализ тонких слоев методом малоуглового рентгеновского рассеяния
3.	Определение параметров многослойных зеркал с помощью рентгеновской рефлектометрии.
4.	Определение отклонения среза подложек кремния, арсенида галлия и сапфира
5.	Рентгеновский дифракционный анализ эпитаксиальных слоев $YBa_2Cu_3O_{7-d}$
6.	Определение параметров многослойных зеркал в диапазоне мягкого рентгена.
7.	Прецизионное измерение коэффициентов отражения многослойных зеркал в диапазоне мягкого рентгена
8.	Элементный анализ поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа
9.	Морфометрический анализ поверхности с помощью растрового электронного микроскопа
10.	Электронная литография с помощью сканирующего электронного микроскопа
11.	Анализ поверхности с помощью сканирующей зондовой микроскопии
12.	Измерение параметров шероховатости поверхности с помощью профилометра модели 130
13.	Анализ поверхности с помощью интерферометра белого света
14.	Послойный элементный анализ методом вторично-ионной масс-спектрометрии.

15.	Послойный анализ гетеросистем GeSi/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе TOF.SIMS-5
16.	Определение концентрации кислородсодержащих термодоноров в кремнии методом абсорбционной ИК спектроскопии.
17.	Определение квантовой эффективности в кремниевых светоизлучающих структурах, легированных эрбием.
18.	Определение электроактивных примесей в моноизотопном кремнии.
19.	Исследование спектров пропускания, фотопроводимости, люминесценции и стимулированного излучения полупроводниковых структур, кристаллов и диэлектрических материалов методом Фурье-спектроскопии.
20.	Измерение вольт-амперных характеристик сверхпроводящих мостиков и джозефсоновских переходов
21.	Измерение транспортных (осцилляции Шубникова – де Гааза) и оптических в терагерцовом диапазоне (фотопроводимость, циклотронный резонанс) характеристик полупроводниковых гетероструктур при низких температурах

Руководитель работ по контракту
зам. директора по НИР ИФМ РАН, д.ф.-м.н.



В.И. Шашкин В.И. Шашкин

«25» ноября 2011 г.