

На правах рукописи

Пестов Алексей Евгеньевич

**РАЗВИТИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ 13,5 НМ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научные руководители: член – корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
Салашенко Н.Н.  
кандидат физико-математических наук,  
Чхало Н.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Асадчиков В.Е.

кандидат физико-математических наук  
Дроздов Ю.Н.

Ведущая организация: Институт проблем технологии  
микрoeлектроники и особочистых материалов РАН, Московская область,  
Черноголовка

Защита состоится « 16 » ноября 2006 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 в Институте физики  
микроструктур РАН 603950, Нижний Новгород, ГСП – 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
микроструктур РАН.

Автореферат разослан « 16 » октября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
К.П.

Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время мы являемся свидетелями стремительного прогресса в технологии микроэлектронных устройств. Ключевым звеном в технологическом прогрессе является литографическое оборудование. Оно включает в себя источник излучения, оптическую систему переноса изображения, систему позиционирования, сканирования и совмещения маски и фотошаблона.

Основные успехи в области субмикронной литографии связаны с применением эксимерных лазеров с длинами волн 248 и 193 нм. Мировым лидером по производству литографического оборудования является нидерландская компания ASM Lithography. Выпускаемая этой компанией литографическая установка TWINSCAN AT: 1200B, оснащенная 20-Вт *ArF* – эксимерным лазером с рабочей длиной волны 193 нм, обеспечивает пространственное разрешение 80 нм на пластинах диаметром 300 мм. Однако возможности оптических систем ограничены дифракционным пределом, соответственно разрешаемая полоса не может быть существенно меньше длины волны света. Согласно критерию Рэлея, эта величина в проекционных оптических системах прямо

пропорциональна длине волны света  $\lambda$ :  $a_{\min} = \frac{k\lambda}{NA}$ , здесь  $k$  –

коэффициент пропорциональности (порядка 1),  $NA$  – числовая апертура объектива. Возможности увеличения диаметров линз практически исчерпаны как экономически (высокая стоимость линз с большой апертурой), так и технологически. Поэтому производители сверхбольших интегральных схем (СБИС) ведут работы в области корректировки изображения маски, благодаря которым распределение освещенности на подложке соответствует желаемому, несмотря на дифракцию излучения. Другое решение заключается в применении так называемых фазосдвигающих фотошаблонов. На их поверхность селективно наносятся материалы, которые перекрывают пучки, приводящие к размытости изображения, вызванной дифракцией. Оба этих пути ведут к усложнению, а значит и удорожанию, конструкции масок, а также к существенному браку при их производстве.

В рамках УФ – литографии перспективным считается уменьшение длины волны излучения, в частности – переход к длине волны 157 нм (излучение эксимерного  $F_2$  – лазера). Однако возможности и этой технологии для перехода к размерам нанометрового диапазона также ограничены, в том числе, и существующими в настоящее время материалами линз.

Все это обращает внимание на экстремальный ультрафиолетовый (ЭУФ) диапазон электромагнитного излучения ( $30 > \lambda > 10$  нм). Именно

здесь в последнее время достигнут заметный прогресс при создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения. Одним из центральных моментов здесь можно считать создание зеркал, обладающих высоким коэффициентом отражения в ЭУФ и мягкой рентгеновской (МР) области спектра. Для этого используются многослойные брэгговские покрытия на атомарно-гладкой поверхности массивной подложки с заданной кривизной.

На многослойных рентгеновских зеркалах на основе пары материалов *Mo/Si* в настоящее время достигнут коэффициент отражения, приближающийся к 70% при длине волны 13,4 нм (теоретический предел  $R_{max} \approx 74\%$ ). Существуют другие эффективные решения, обеспечивающие  $R \geq 60\%$ , но все они относятся к диапазону длин волн 10-15 нм с абсолютным теоретическим максимумом в районе 13,4 нм [1,2]. Это и есть основная причина, по которой все разработки в настоящее время сосредоточены на использовании именно этой длины волны.

Вся литографическая установка может быть представлена в виде четырех основных блоков: а) источник ЭУФ излучения; б) маска, с нанесенным на нее рисунком ИС; в) проекционная оптическая система; г) образец (пластина), с нанесенным на его поверхность ЭУФ резистом.

Источником ЭУФ излучения обычно являются лазерная плазма, генерируемая импульсным излучением мощного частотного лазера, сфокусированным на некоторую мишень или сильнооточный разряд в газе [3]. Основной проблемой, не позволяющей до настоящего времени достичь требуемого уровня мощности ЭУФ излучения, является эрозия электродов и изоляторов разрядной камеры под воздействием мощных тепловых потоков и бомбардировки быстрыми ионами (ионное распыление). Одним из следствий этого является загрязнение поверхности зеркал продуктами этой эрозии. Остроту проблемы можно проиллюстрировать на примере того, что в течение нескольких минут работы первых газоразрядных источников на основе *Xe* при скромных энергетических параметрах коэффициенты отражения зеркал падали на порядки величин [4].

### **Основные цели работы:**

1. Разработать рефлектометр, предназначенный для изучения влияния источников излучения и вакуумных условий на коэффициенты отражения зеркал на длине волны 13,5 нм. Рефлектометр должен иметь обнаружительную способность на уровне лучше 1%.
2. Определить коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресценции кремниевой линии в ЭУФ диапазоне. На основе этих исследований оптимизировать энергию электронного пучка, углы падения электронов и отбора излучения из мишени с целью разработки рентгеновской трубки с максимальной яркостью на длине волны 13,5 нм.

3. Показать возможность применения рентгеновских трубок (РТ) для задач проекционной литографии на длине волны 13,5 нм.
4. Развитие методики диффузного рассеяния с целью детального изучения структуры переходных слоев в многослойных рентгеновских зеркалах (МРЗ).

### **Научная новизна работы**

1. Разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию лабораторный рефлектометр, позволяющий определять абсолютное значение коэффициентов отражения и пропускания на длине волны 13,5 нм с точностью 0,1%. Ранее такие точности были доступны только в синхротронных центрах. Использование пары многослойных рентгеновских зеркал в качестве монохроматора позволило более чем на три порядка повысить интенсивность зондирующего пучка на образце по сравнению со стандартным рефлектометром скользящего падения на основе дифракционной решетки – РСМ-500. Путем смены пары зеркал монохроматора прибор может быть перестроен на любой другой диапазон длин волн, для которых имеется возможность напыления МРЗ с высокими коэффициентами отражения при нормальных углах падения излучения.
2. Впервые экспериментально измерен коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию характеристической линии  $Si\ L\alpha$ , изучены угловые зависимости выхода излучения из кремниевой мишени.
3. Показана возможность использования рентгеновской трубки с кремниевой мишенью для решения ряда задач проекционной ЭУФ литографии на длине волны 13,5 нм.
4. Впервые удалось разделить вклады перемешивания и микрошероховатости в несовершенство межслоевых границ в многослойных структурах.

### **Практическая значимость работы**

1. Появление светосильного рефлектометра позволило начать работы по исследованию влияния источников ЭУФ излучения на коэффициенты отражения МРЗ, а также существенно, более чем на порядок, увеличить точность определения коэффициентов пропускания тонкопленочных абсорбционных фильтров (ТАФ) и отражения МРЗ, а также сократить время измерений. Помимо МРЗ и ТАФ прибор позволяет изучать чувствительность и пространственное разрешение ЭУФ резистов, флуоресценцию материалов в МР и ЭУФ диапазонах и др.
2. Изучены особенности работы вторичных электронных умножителей на основе микроканальных пластин (МКП) и каналовых электронных умножителей (КЭУ) в условиях высоких интенсивностей падающего излучения. Созданы две детекторные системы. Универсальная

детекторная система предназначена для регистрации излучения в ЭУФ и МР диапазонах в режиме счета фотонов. Она позволяет работать с различными типами детекторов: фотоэлектронные умножители, шевронные и Z-сборки МКП, каналовые умножители. Спектрально-селективная детекторная система позволяет проводить аттестацию источников ЭУФ излучения для литографических установок и нашла применение в ряде лабораторий.

3. Разработанные в рамках диссертационной работы рентгеновские трубки находят применение в работах как по ЭУФ литографии, так и для рефлектометрии МР и ЭУФ диапазона.

4. Развита методика диффузного рассеяния, при помощи которой получен ряд результатов, важных как для понимания физики роста многослойных структур (МС), так и для дальнейшего совершенствования технологии роста.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Основные положения, выносимые на защиту формулируются следующим образом:

1. Создан светосильный лабораторный рефлектометр, позволяющий изучать коэффициенты отражения и прохождения элементов рентгеновской и экстремальной ультрафиолетовой оптики с точностью на уровне 0,1%.

2. Оптимизированы параметры работы детекторов на основе микроканальных пластин и каналовых электронных умножителей в условиях интенсивных потоков падающего излучения. Разработаны две детекторные системы, предназначенные для регистрации МР и ЭУФ излучения. Универсальная система обеспечивает регистрацию излучения в режиме счета единичных фотонов. Вторая, спектрально-селективная, предназначена для паспортизации источников ЭУФ излучения для литографии 13,5 нм.

3. Измерен коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресцентного излучения с длиной волны 13,5 нм, который для электронов с энергией 6 кэВ составил  $3,03 \cdot 10^{-6}$ . Определены, как экспериментально, так и теоретически, угловые зависимости интенсивности флуоресценции *Si L $\alpha$*  линии.

4. Экспериментально показана возможность применения рентгеновских трубок с кремниевым анодом для ряда задач проекционной литографии 13,5 нм. Предложена дифракционная маска, которая уже на данном этапе позволит исследовать пространственное разрешение фоторезистов на 13,5 нм с разрешением до 15 нм.

5. Разработана методика диффузного рассеяния (ДР) для исследования внутреннего строения МС. Основные преимущества этой методики по сравнению с развитыми ранее: возможность учета динамических

эффектов ДР без привлечения трудоемкого алгоритма рекуррентных соотношений и разделение вкладов микрошероховатости и перемешивания слоев в длину переходных областей МС. Этим методом изучены МС на основе  $W/B_4C$ ,  $Mo/Si$ . Получен ряд физических результатов, важных как для понимания физики роста МС, так и для дальнейшего совершенствования технологии роста.

### **Личный вклад автора в получение результатов**

- Равнозначный в разработку оптической схемы, конструкционные особенности двухзеркального рефлектометра (совместно с Н.И. Чхало) [A1, A3, A5, A7, A12, A13].
- Основной в отработку методик и проведение измерений коэффициентов отражения многослойных зеркал и пропускания тонкопленочных фильтров на длине волны 13,5 нм с точностью лучше 0,2% [A18, A19, A20, A21, A22].
- Определяющий в работе по изучению детекторов для МР и ЭУФ диапазона, оптимизации их параметров и режимов работы [A2, A9, A10, A17].
- Определяющий в постановке и проведении экспериментов по определению коэффициента конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресценции характеристической линии  $Si\ La$  [A18, A22].
- Равнозначный в изучении ЭУФ резиста на длину волны 13,5 нм, определении порога чувствительности и получении первого литографического изображения при использовании РТ с кремниевой мишенью в качестве источника ЭУФ излучения, а также подготовке эксперимента по изучению пространственно разрешения резиста на наномасштабах (совместно с Н.И. Чхало, А.Я. Лопатиным, Д.Г. Раскиным).
- Равнозначный в разработку РТ и оптимизацию условий генерации излучения с длиной волны 13,5 нм РТ с кремниевой мишенью (совместно с Н.И. Чхало) [A2, A7, A12, A22].
- Равнозначный в развитие методики изучения структурных параметров многослойных структур методом диффузного рассеяния (совместно с А.А. Фраерманом и Н.И. Чхало) [A4, A6, A8, A11, A14, A15, A16].

### **Апробация работы**

Все работы были представлены в реферируемых научных и специализированных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в данной диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях, симпозиумах и совещаниях:

на конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов. ИК

РАН. Москва. 17-22 ноября 2003; на международной конференции в Саппоро (Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures. March 7-11 2004. Rusutsu Resort. Sapporo. Japan); на всероссийской конференции по использованию синхротронного излучения СИ-2002. ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Новосибирск. 2002; на конференции “Рентгеновская оптика-2002” ИФМ РАН. Нижний Новгород; на совещании “Рентгеновская оптика-2004”. ИФМ РАН. Нижний Новгород. 2004; на совещании “Рентгеновская оптика-2005”. ИФМ РАН. Нижний Новгород. 2005; на совещании “Нанофизика и наноэлектроника-2006”. ИФМ РАН. Нижний Новгород. 2006.

### **Публикации по теме диссертации**

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 23 работы. Из них 8 статей в научных журналах и 15 публикации в сборниках конференций и тезисов докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата [А1-А23].

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы. Объем диссертации составляет 151 страницу, приведено 93 рисунка и 15 таблиц. Обзор современных достижений, представленных в научных публикациях других исследовательских групп в областях диссертационного исследования по всем представленным направлениям, рассматривается в начале каждой соответствующей главы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, изложены цели работы, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и дан краткий обзор характеристики выполненных исследований.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена светосильному, лабораторному рефлектометру, предназначенному прежде всего для изучения загрязнений зеркал в литографических установках. Подробно описывается оптическая схема и принцип работы прибора. Особое внимание отводится описанию монохроматора на основе двух (сферического и плоского) многослойных зеркал. Отдельный параграф отведен мотивации выбора МРЗ в качестве диспергирующих элементов (рассматриваются вопросы селективности МС, коэффициентов отражения на рабочей длине волны 13,5 нм), указываются преимущества зеркал по сравнению с дифракционными решетками. Сравнение прибора со стандартным рефлектометром на базе спектрометра скользящего падения с дифракционной решеткой в качестве диспергирующего элемента РСМ-

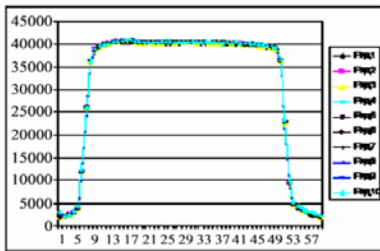


500 показало, что интенсивность зондирующего пучка в данном приборе более, чем на три порядка выше. Это связано с тем, что прибор имеет большую светосилу из-за большой рабочей апертуры зеркал и большую эффективность – коэффициенты отражения от зеркал больше, чем эффективность решетки. Параметры сравнения приведены в таблице 1.

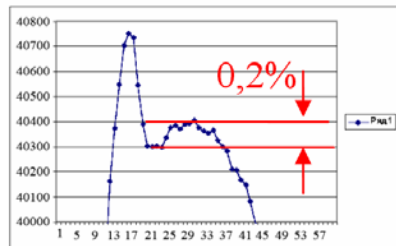
**Таблица 1.** Сравнение двухзеркального рефлектометра (DMR) и PCM-500

	PCM-500 [A1]	DMR [A3]	Выигрыш
$\lambda$ , нм	13,5	13,5	-
$\Delta\lambda$ , нм	0,15	0,15	-
Диаметр зондирующего пучка на образце, мм	1	1	-
размер источника, мм <sup>2</sup>	0,1·0,5	0,5·0,5	5
$\Omega$ (сферическое зеркало РСМ), стеррад	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^3$
$\Omega$ (торроидальное зеркало РСМ), стеррад	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^2$
Эффективность отражения	$1 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	3,9
Суммарный выигрыш (сферическое зеркало РСМ)			$7,4 \cdot 10^4$
Суммарный выигрыш (торроидальное зеркало РСМ)			$2,7 \cdot 10^3$

Наиболее подробно в данной главе представлены результаты тестирования прибора. Проводилось изучение размера пучка для повышения локальности и точности измерений. Приводятся кривые, демонстрирующие возможности прибора по определению малых изменений коэффициентов отражения:



**Рис.1.а).** Зависимости интенсивности отраженного излучения от координаты точки падения излучения на образец (10 измерений).



**Рис.1.б).** Усреднение по 10 зависимостям приведенное в другом масштабе.

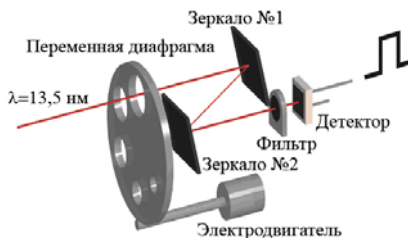
Видно, что особенность, составляющая всего 0,2%, надежно разрешается.

Также, в данной главе продемонстрирована возможность расширения области применения прибора для решения более широкого класса задач, нежели только измерение относительных коэффициентов отражения, в частности, показана возможность измерения абсолютного значения коэффициентов пропускания тонкопленочных абсорбционных фильтров на просвет с точностью определения этого коэффициента на уровне 0,1%. Подобный прибор поставлен в Голландию в компанию ASML, где активно и успешно работает для аттестации образцов, подвергшихся воздействию эрозионных потоков из источника ЭУФ излучения.

**Вторая глава** посвящена изучению характеристик однофотонных детекторов. Высокие требования к точности современных рефлектометрических схем заставили более внимательно посмотреть на возможное влияние характеристик детектора на регистрируемые величины. В частности, на проблему линейности регистрации потоков рентгеновского и ЭУФ излучения. В главе описываются методики исследования основных характеристик детекторов. Приводится сравнение характеристик различных типов детекторов. В рамках диссертационной работы изучались два типа детекторов – это каналовые электронные умножители (КЭУ) и разработанные совместно с НИИЭПР (г. Москва) детекторы на основе микроканальных пластин (МКП). Результатом работы по оптимизации параметров работы детекторов явилась разработка двух детекторных систем. Универсальная детекторная система (рис.2), предназначена для регистрации МР и ЭУФ излучения, а также любых корпускулярных потоков вызывающих вторичную электронную эмиссию. Она может работать с различными типами детекторов, такими как фотоэлектронные умножители, детекторы на основе МКП и КЭУ. Электроника обеспечивает скорость счета до  $10^6$  фотонов в секунду.



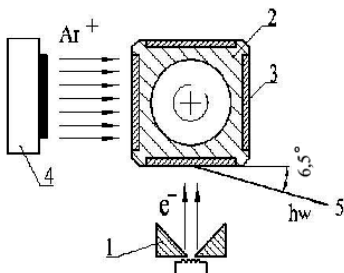
**Рис.2.** Фотография детекторной системы.



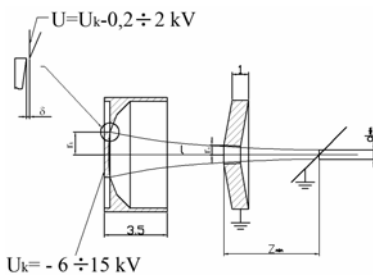
**Рис.3.** Оптическая схема измерителя мощности.

Значительное внимание в данной главе уделяется абсолютно калиброванному измерителю мощности (рис.3). Его особенностью является двухзеркальный монохроматор, с помощью которого можно промоделировать спектральную полосу пропускания любой многозеркальной схемы литографической установки. Он предназначен для аттестации источников для ЭУФ литографов. В качестве детектора здесь используется кремниевый поверхностно барьерный диод AXUV-100 фирмы IRD (США), прокалиброванный на синхротроне BESSY-2 (Германия). В настоящее время несколько таких приборов поставлено в различные лаборатории мира и используются для изучения источников для ЭУФ литографии.

**В третьей главе** изучаются особенности применения разборных рентгеновских трубок для генерации излучения с длиной волны 13,5 нм. Описываются разработанные в ходе работы над диссертацией две рентгеновские трубки, имеющие ряд важных особенностей, выделяющих их из ряда подобных устройств. Особенностью первой из них (см. рис. 4) является наличие встроенного ионного источника, который обеспечивает чистку мишени методом ионно-пучкового травления без вскрытия на атмосферу, за счет чего удалось повысить стабильность излучательных характеристик и продлить срок службы термокатода. В настоящее время эксплуатируется несколько таких трубок. И наработка каждой уже превысила 3000 часов. Для генерации излучения 13,5 нм РТ комплектуется специальным держателем мишеней, содержащим две мишени вольфрама и две – кремния, смена мишени осуществляется вращением держателя без вскрытия на атмосферу. При работе с вольфрамовой мишенью используется широкополосное тормозное излучение; при работе с кремнием - линия *Si La*, имеющая максимум эмиссии на длине волны 13,5 нм. Основным отличием второй трубки от большинства используемых, является применение трех электродной системы (рис.5), преимуществами которой являются: возможность управления размером пучка в широких пределах; отсутствие ионной бомбардировки термокатода, что позволило использовать материал с меньшей работой выхода –  $\text{LaB}_6$ . В качестве мишени используется кремниевая пластина толщиной 0,3 мм, припаянная к водоохлаждаемому медному держателю. Описывается методика измерения основных характеристик пучка ЭУФ излучения – интенсивности и размера.



**Рис.4.** Схема РТ.1-электронная пушка; 2- водоохлаждаемый держатель; 3- припаянная мишень; 4-ионный источник; 5-рентгеновский пучок.



**Рис.5.** Электронно-оптическая схема новой рентгеновской трубки.

Изучены угловые зависимости интенсивности флуоресценции  $Si$  мишени на длине волны 13,5 нм. Впервые приводится оценка коэффициента конверсии энергии электронного пучка в энергию излучения 13,5 нм. Большое внимание уделяется описанию алгоритма и программе для расчета характеристик флуоресценции в МР и ЭУФ диапазонах твердых тел под воздействием электронных пучков. Приводится сравнение экспериментально измеренных и расчетных данных по угловым зависимостям флуоресценции  $Si La$  линии.

**Четвертая глава** диссертации посвящена вопросу возможности использования РТ с  $Si$  мишенью для задач проекционной литографии 13,5 нм. Приведены прямые экспериментальные данные, подтверждающие эту возможность, впервые показана возможность использования РТ с кремниевой мишенью для задач литографии на 13,5 нм. Получены первые изображения по методу контактной литографии, определен порог чувствительности фоторезиста (резист изготовлен в НИИ Химии при ННГУ им. Н.И. Лобачевского), значение которого составило 5 мДж/см<sup>2</sup>. Также в главе предлагается дифракционная маска, которая уже на данном этапе позволяет начать исследование фоторезистов на 13,5 нм с пространственным разрешением до 15 нм. Также рассмотрены основные требования к ЭУФ пучку для проведения этих исследований.

**В пятой главе** описывается развитая в рамках данной диссертационной работы методика диффузного рассеяния рентгеновского излучения многослойными структурами с коррелированными шероховатостями.

Основным фактором, снижающим коэффициент отражения МС, является несовершенство межслоевых границ, которое характеризует глубина переходной области. Разделяют два механизма, дающих вклад в глубину переходной области: это непосредственно геометрическая шероховатость (профиль границ), а также перемешивание материалов за счет их взаимной диффузии и имплантации высокоэнергетичных частиц в

процессе роста МС. В рамках данного подхода, теоретически удалось разделить вклады этих двух механизмов в глубину переходной области.

В динамическом случае необходимо полностью решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i q_1 \frac{\partial E_{1p}}{\partial z} - \Delta_p E_{1p} + k_0^2 a_1 \Phi_0 E_{2p} = -k_0^2 a_1 \sum_{p \neq p} \Phi_{p-p} E_{2p} \\ -i q_1 \frac{\partial E_{2p}}{\partial z} - \Delta_p E_{2p} + k_0^2 a_1 \Phi_0 E_{1p} = -k_0^2 a_1 \sum_{p \neq p} f_{p-p} E_{1p} \end{cases}, \text{ где}$$

$$\Delta_p = (\mathbf{p}_0 + \mathbf{p})^2 - k_0^2 a_0 + \frac{q_1^2}{4}, \quad \mathbf{p}_0 = (0, k_0 \cos \varphi_0) \quad \text{и} \quad \mathbf{p} = (k_0 \cos \mathcal{G} \sin \varphi, k_0 \cos \mathcal{G} \cos \varphi)$$

составляющие волновых векторов падающей и рассеянных волн вдоль слоёв МС,  $\varphi_0$  – угол скольжения для падающей волны,  $\varphi$  и  $\mathcal{G}$  полярный и азимутальный углы рассеянной волны,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения в вакууме. Фактически,  $\Delta_p$  является отстройкой от условия Брэгга для рассеянных волн. Коэффициент  $a_1$  представляет собой амплитуду первой Фурье-гармоники диэлектрической проницаемости МС. С учетом перемешивания пленок

$$a_1 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\pi} \cdot \sin(\pi \cdot \beta) \cdot \exp\left(-q_1^2 \cdot \frac{\sigma_m^2}{2}\right), \text{ где}$$

$q_1 = \frac{2\pi}{d}$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости материалов пленок,  $\beta$  – доля вещества 2 в периоде.  $f_p = \int e^{-i q_1 z(\tau)} e^{-i p \tau} d\tau$ ,  $\Phi_p = f_{-p}^*$ . Звёздочка в последнем выражении означает комплексное сопряжение.

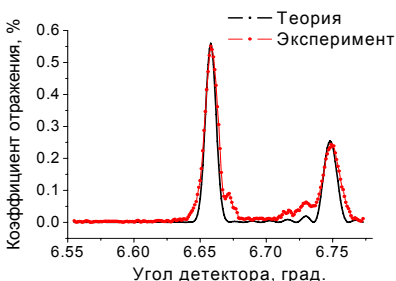
$$\Phi_0 = \Phi_{p=0} = f_{p=0} = e^{-\frac{q_1^2 \sigma_r^2}{2}}, \text{ где } \sigma_r^2 - \text{ дисперсия шероховатостей.}$$

А в кинематическом приближении получается простое выражение для интенсивности рассеянной волны:

$$\langle |E_{z,p}(z=0)|^2 \rangle = \frac{4k_0^4 a_1^2}{(\Delta_p + \Delta_0)^2} \langle |f_p|^2 \rangle \sin^2 \frac{(\Delta_p + \Delta_0)L}{2q_1}, \text{ причем перемешивание входит в } a_1,$$

а шероховатость в  $f_p$ . При  $p=0$  (случай зеркального отражения) глубина переходной области представляется в виде:  $\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_m^2}$ .

Посредством этой методики изучались МС на основе пар материалов  $W/B_4C$  с периодами от 1,5 до 0,8 нм и  $Mo/Si$  оптимизированных на длину волны 13,5 нм. Типичный спектр диффузного рассеяния представлен на рис.6 (кружочки – экспериментальная кривая, сплошная линия – результат моделирования).



**Рис.6.** Спектр диффузного рассеяния рентгеновского излучения от МС на основе пары  $W/B_4C$  с периодом 1,315 нм.

Данная кривая получена на рентгеновском дифрактометре Philips X'Pert Pro посредством так называемого  $2\theta$  – скана (угол падения излучения на образец фиксированный, а сканирование ведется детектором). Как показали результаты

моделирования в МС на основе пары  $W/B_4C$ , основной вклад в несовершенство межслоевых границ вносит перемешивание, а для структур на основе  $Mo/Si$  доминирующим фактором оказывается шероховатость.

### Основные результаты работы

К основным результатам диссертационной работы можно отнести:

1. Создан светосильный лабораторный рефлектометр, позволяющий изучать коэффициенты отражения и прохождения элементов рентгеновской и ЭУФ оптики с точностью на уровне 0,1%, что ранее было возможно только в синхротронных центрах.
2. Разработаны две детекторные системы, предназначенные для регистрации МР и ЭУФ излучения. Спектрально-селективная система обеспечивает аттестацию мощности источников излучения для ЭУФ литографии. В настоящее время такие системы используются в ряде лабораторий мира.
3. Измерен коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресцентного излучения  $Si\ La$  - линии с длиной волны 13,5 нм. Экспериментально показана возможность применения рентгеновских трубок с кремниевым анодом для задач проекционной литографии 13,5 нм.
4. Предложена дифракционная маска, которая уже на данном этапе позволит исследовать пространственное разрешение ЭУФ фоторезистов с разрешением 15 нм.
5. Разработана методика диффузного рассеяния (ДР) для исследования внутреннего строения МС. Основные преимущества этой методики по сравнению с развитыми ранее: возможность учета динамических эффектов ДР без привлечения трудоемкого алгоритма рекуррентных соотношений и разделение вкладов микрошероховатости и перемешивания слоев в длину переходной области МС. Этим методом изучены МС на основе  $Mo/Si$ ,  $W/B_4C$ . Получен ряд результатов, важных как для понимания физики, так и для дальнейшего совершенствования технологии роста МС.

## Список цитируемой литературы

- [1] Kim, D.-E. Optimized Structures of Multilayer Soft X-Ray Reflectors in the Spectral Range of 30 to 300 Å / D.-E. Kim, D.-H. Cha, S.-W. Lee // Japanese Journal of Applied Physics. – 1998. – Vol. 37. – P. 2728–2733.
- [2] Салашенко, Н.Н. Исследования в области многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН / Н.Н. Салашенко // Материалы всероссийского совещания “Рентгеновская оптика”. Нижний Новгород. – 1998. – С. 53–68.
- [3] Mohanty, S.R. Recent progress in EUV source development at GREMI / S.R. Mohanty, C. Cachoncinlle, C. Fleurier, E. Robert, J.-M. Pouvesle, R. Viladrosa, R. Dussart // Microelectronic engineering. – 2002. – Vol. 61-62. – P.179–185.
- [4] Stam, U. High power EUV lithography sources based on gas discharges and laser produced plasmas/ U. Stam, I. Ahmad, I. Balogh, H. Birner, D. Bolshukhin, J. Bruderman, S. Enke, F. Flohrer, K. Gabel, S. Gotze, G. Hergenhan, J. Kleinschmidt, D. Klopfel, V. Korobotchko, J. Ringling, G. Schriever, C.D. Tran, C. Ziener // Proc. SPIE – 2003. – Vol. 5037. – P.119–129.

## Список публикаций автора

- [A1] Bibishkin, M.S. Laboratory methods for investigations of multilayer mirrors in Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray region / M.S. Bibishkin, D.P. Chehonadskih, N.I. Chkhalo, E.B. Kluyenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev // Proceedings SPIE. – 2004. – V.5401. – P.8–15.
- [A2] Бибишкин, М.С. Характеристики детекторов на основе МКП и каналовых умножителей при работе в счетном режиме / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – №7. – С. 5–8.
- [A3] Бибишкин, М.С. Двухзеркальный рефлектометр для относительных измерений коэффициентов отражения многослойных зеркал на длине волны 13.5 нм / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Известия РАН. Серия физическая. – 2004. – Т.68. – № 4. – С.560–564.
- [A4] Бибишкин, М.С. Исследование характеристик многослойных рентгеновских зеркал с ультракороткими периодами  $d=0.7-2.4$  нм / М.С. Бибишкин, Ю.А. Вайнер, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашенко, А.А. Фраерман, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. – 2005. – Т.69. – № 2. – С.199–206.

- [A5] Andreev, S.S. Application of free-standing multilayer films as polarizers for X-ray radiation / S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2005. – V.543. – P.340–345.
- [A6] Bibishkin, M.S. Ultra-short period X-ray mirrors: Production and investigation / M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2005. – V.543. – P.333–339.
- [A7] Бибишкин, М.С. Рефлектометр с модернизированной оптической схемой для исследования элементов рентгенооптики в диапазоне 0,6–20 нм // М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – №2. – С.23–27.
- [A8] Vainer, Yu.A. Analysis of transverse correlation of surface roughness in multilayer structures with ultrashort periods / Yu.A. Vainer, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, A.A. Fraerman, V.V. Chernov, N.I. Chkhalo // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2006. – Vol.130. – No.3. – P.345–351.
- [A9] Бибишкин, М.С. Характеристики детекторов на основе МКП и каналовых умножителей при работе в счетном режиме / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2002. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2002. – С.247–251.
- [A10] Бибишкин, М.С. Оптимизация детекторов на основе МКП и каналовых умножителей для регистрации мягкого рентгеновского излучения / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Материалы XIV Российской конференции по использованию синхротронного излучения СИ-2002. ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Новосибирск. – 2002. – С. 125.
- [A11] Андреев, С.С. Исследование отражательных характеристик многослойных зеркал в диапазоне длин волн 0.6–10 нм / С.С. Андреев, М.С. Бибишкин, Б.А. Володин, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Тезисы докладов IV Национальной конференции по применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов. ИК РАН. Москва. – 2003. – С.494.
- [A12] Бибишкин, М.С. Светосильный рефлектометр для изучения влияния источников ЭУФ излучения на отражательные характеристики зеркал / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Тезисы докладов IV Национальной конференции по применению Рентгеновского,



- Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов. ИК РАН. Москва. – 2003. – С.522.
- [A13] Bibishkin, M.S. Apparatus and methods for investigations of multilayer mirrors in the 0.6-20 nm spectral range / M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, E.B. Klyuenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev // Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures. March 7-11 2004. Rusutsu Resort. Sapporo. Japan. – 2004. – P.O7-02.
- [A14] Бибишкин, М.С. Исследование характеристик многослойных зеркал с ультрамалыми периодами  $d = 0.8 - 2.4$  нм / М.С. Бибишкин, Ю.А. Вайнер, Б.А. Володин, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, А.А. Фраерман, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2004. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2004. – С.136–137.
- [A15] Вайнер, Ю.А. Применение метода диффузного рассеяния для изучения внутреннего строения короткопериодных W/V<sub>4</sub>C многослойных структур / Ю.А. Вайнер, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, А.А. Фраерман, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2004. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2004. – С.205–207.
- [A16] Ахсахалян, А.Д. Короткопериодная рентгеновская оптика для коллимации, фокусировки и поляризации рентгеновского излучения / А.Д. Ахсахалян, Ю.А. Вайнер, Е.Б. Клюенков, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2005. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2005. – Т.1. – С.60–63.
- [A17] Забродин, И.Г. Абсолютно калиброванный измеритель EUV мощности для аттестации и оптимизации источников излучения на 13,5 нм / И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, Н.Н. Салащенко, Л.А. Суслов, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2005. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2005. – Т.2. – С.302–303.
- [A18] Бибишкин, М.С. Проект литографического стенда на основе объектива Шварцшильда с рабочей длиной волны 13,5 нм / М.С. Бибишкин, Н.Б. Вознесенский, Е.Б. Клюенков, Е.Л. Панкратов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания Рентгеновская оптика-2005. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2005. – Т.2. – С.479–480.
- [A19] Бибишкин, М.С. Многослойные поляризаторы для мягкого рентгеновского диапазона длин волн / М.С. Бибишкин, Ю.А. Вайнер, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, В.В. Чернов, Н.И. Чхало // Материалы всероссийского совещания

Рентгеновская оптика-2005. ИФМ РАН. Нижний Новгород. – 2005. – Т.2. – С.493–494.

[A20] Бибишкин, М.С. Многослойные абсорбционные фильтры для спектральной области 13,5 нм / М.С. Бибишкин, С.А. Гусев, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Ю.А. Вайнер, Е.Б. Клюенков, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Материалы всероссийского симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2006. – С.114–115.

[A21] Бибишкин, М.С. Характеристики абсорбционных EUV-фильтров при высоких тепловых нагрузках / М.С. Бибишкин, С.А. Гусев, И.Г. Забродин, А.Ю. Климов, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Материалы всероссийского симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2006. – С.358–359.

[A22] Забродин, И.Г. Новая мощная трубка на длину волны 13,5 нм / И.Г. Забродин, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, Д.Г. Раскин, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, В.А. Кузнецов, В.М. Артюхов // Материалы всероссийского симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2006. – С.387.

[A23] Зуев, С.Ю. Влияние антидиффузионных слоев  $B_4C$  и  $Cr$  на отражательные характеристики многослойных рентгеновских зеркал на основе  $Mo/Si$  / С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко // Материалы всероссийского симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2006. – С.391.

Пестов Алексей Евгеньевич

**РАЗВИТИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ 13,5 НМ**

Автореферат

Подписано к печати 10 октября 2006 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН, 603950,  
Нижний Новгород, ГСП – 105.