

На правах рукописи

Чхало Николай Иванович

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРНЫХ И  
ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ  
РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород - 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте физики микроструктур РАН

Научный консультант:

член – корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук  
Салащенко Николай Николаевич,  
ИФМ РАН, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты:

член – корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук  
Квардаков Владимир Валентинович,  
РНЦ «Курчатовский институт», г.  
Москва

доктор физико-математических наук,  
профессор Бушуев Владимир  
Алексеевич, МГУ, г. Москва

доктор физико-математических наук  
Рагозин Евгений Николаевич,  
ФИ РАН, г. Москва

Ведущая организация:

Физико-технологический институт  
РАН, Москва

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 в Учреждение Российской  
академии наук Институт физики микроструктур РАН 603950,  
Нижний Новгород, ГСП – 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Гайкович К.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

Благодаря сочетанию ряда уникальных свойств многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) являются одними из наиболее универсальных элементов современной рентгенооптики как с точки зрения диапазона длин волн, в котором они применяются (0,01-60 нм), так и по функциям: монохроматизация, фокусировка, коллимация, построение изображений, поляризация рентгеновского излучения. Эффективность применения МРЗ в научных и прикладных исследованиях напрямую зависит от их физических, прежде всего, отражательных, характеристик. Свойства МРЗ, по сути являющихся продуктом атомной инженерии, целиком определяются микроструктурой пленок на атомарных и суб-атомарных масштабах. В частности, для обеспечения конструктивной интерференции волн, отраженных от различных границ, допустимые флуктуации толщин пленок должны быть на уровне сотых долей монослоя. Другим важным фактором, существенно влияющим на коэффициенты отражения МРЗ, является наличие переходных областей между пленками, которые формируются за счет взаимодиффузии материалов пленок, имплантации высокоэнергичных атомов и ионов поступающего конденсата, и ростовых процессов. К этому необходимо добавить, что все эти процессы являются сложной функцией толщин пленок, физико-химических и геометрических свойств поверхности подложки и условий роста.

Среди макроскопических факторов, влияющих на коэффициенты отражения МРЗ, следует отметить отличие плотностей тонких пленок от табличных значений. Из-за малой разницы диэлектрических проницаемостей материалов в рентгеновском диапазоне даже небольшие отличия плотностей пленок от табличных значений (10-20%) могут приводить к значительному, в разы, падению коэффициентов отражения МРЗ. Плотности пленок определяются их микроструктурой.

Дополнительные сложности возникают при синтезе МРЗ с переменным по поверхности периодом  $D$ , градиент которого ( $dD/dr$ ) может достигать величин порядка 0,1 нм/мм. При этом отклонение периода от расчетного не должно превышать 0,1-0,3%. Такие

требования нередко предъявляются к структурам, нанесенным на сложные, в общем случае асферические, поверхности.

Учитывая сложность и специфику объекта, потребовалась модернизация традиционных рефлектометрических и дифракционных методик, а также создание новых экспериментальных методов и приборов, физических моделей и подходов для изучения МРЗ. При разработке новых методов исследования МРЗ необходимо было учитывать, что наряду с решением научных задач данные исследования и разработки носили ярко выраженный прикладной характер, связанный с обеспечением проводимых в ИФМ РАН работ в области технологий роста МРЗ.

На отражательные характеристики и изображающие свойства МРЗ существенное влияние оказывают подложки, на которые наносятся многослойные интерференционные структуры. Наряду с общим требованием на атомарную гладкость, к подложкам предъявляются и специфические требования, связанные с особенностями задач, решаемых с помощью МРЗ. Например, для достижения дифракционного предела пространственного разрешения рентгенооптических систем форма поверхности зеркал должна быть выполнена с субнанометровой точностью. Выполнение этих условий потребовало развития новых методов измерения и коррекции формы поверхностей подложек и волновых деформаций рентгенооптических систем.

Непременным условием динамичного развития многослойной рентгенооптики является применение МРЗ в новых приборах и оборудовании. Верно и обратное: достижения в области технологии роста МРЗ открывают новые возможности в конструировании приборов. Таким образом, поиск новых практических приложений МРЗ в науке и технике представляется весьма актуальным.

### **Цель работы:**

- Развитие физических моделей, рефлектометрических методик и сопутствующего оборудования для изучения отражения, прохождения и рассеяния рентгеновского излучения МРЗ с произвольной формой поверхности.
- Развитие и применение на практике комплексных методик для изучения внутреннего строения МРЗ, микроструктуры пленок и межслоевых областей, а также их динамики в процессах роста и термического отжига.

- Развитие принципов построения и методов оптимизации основных элементов спектрометров мягкого рентгеновского излучения на основе МРЗ для диагностики плазмы. Разработка действующих спектрометров.
- Разработка методов коррекции и измерения формы поверхностей подложек и волновых деформаций проекционных объективов с субнанометровой точностью.

### **Научная новизна**

1. Развита модель, которая впервые позволила по угловым зависимостям интенсивности диффузного рассеяния и зеркального отражения рентгеновского излучения многослойными структурами разделить вклады диффузионного перемешивания материалов пленок и геометрической шероховатости в общую глубину переходной области, и обнаружить потерю сплошности пленок по мере уменьшения их толщины.
2. Впервые экспериментально наблюдалось резонансное диффузное рассеяние от МРЗ с ультракороткими, порядка 1 нм, периодами.
3. Разработана модель, которая позволяет по значениям коэффициентов отражения жесткого рентгеновского излучения в брэгговских пиках восстановить структурные параметры МРЗ в случае несимметричного профиля диэлектрической проницаемости в периоде.
4. Измерен коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресцентного излучения L-линии кремния. Показана возможность его увеличения в многослойных Zr/Si мишенях.
5. Изучена микроструктура углеродосодержащих многослойных зеркал и ее изменение в зависимости от толщины слоев металла и температуры отжига. Показан определяющий вклад механизма автокаталитического расслоения слоев металла и углерода и кристаллизации на границах в увеличение коэффициентов отражения МРЗ.
6. Предложен и изучен новый источник сферической волны на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой, обладающий рекордно низкими волновыми абберрациями. На его основе создан интерферометр с дифракционной волной

сравнения для изучения формы поверхностей и волновых деформаций оптических систем с субнанометровой точностью.

7. Развита методика коррекции формы подложек с субнанометровой точностью, при сохранении микрошероховатости корректируемой поверхности на атомарном уровне.

**Практическая значимость** определяется тем, что:

1. Разработаны рефлектометры и экспериментальные методики для изучения локальных значений коэффициентов отражения и пропускания практически всех элементов рентгеновской оптики в диапазоне длин волн 0,6-25 нм. Методики используются при разработке технологий роста МРЗ, отрезающих фильтров, поляризаторов и фазосдвигающих интерференционных элементов, а также для измерения шероховатости подложек и аттестации рентгенооптических элементов. Специализированные рефлектометры применяются для изучения загрязнения и методов очистки оптики, для калибровки фоторезистов и детекторов экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения.

2. На базе штатных дифрактометров в жестком рентгеновском диапазоне разработаны экспериментальные методики для измерения поверхностного распределения основных структурных и дисперсионных характеристик многослойных рентгеновских зеркал.

3. Разработанные спектрометры рентгеновского излучения на основе МРЗ нашли применение для диагностики высокотемпературной плазмы в термоядерных установках и тестирования источников излучения для проекционной ЭУФ и МР литографии.

4. Разработанные разборные рентгеновские трубки являются неотъемлемыми частями рефлектометров МР и ЭУФ диапазонов, применяются в качестве источника МР и ЭУФ излучения для калибровки рентгеноспектральной аппаратуры и проекционной нанолитографии на длине волны 13,5 нм.

5. Доказанная эффективность применения алмазных микропорошков детонационной природы для финишной полировки подложек для рентгеновских зеркал стала основой для развития соответствующей технологии.

6. Разработанный интерферометр с дифракционной волной сравнения и развитые технологии коррекции формы поверхностей заложили основы для развития в стране таких научных и технологических направлений, как проекционная нанолитография, рентгеновская микроскопия и рентгеновская астрономия сверхвысокого разрешения.

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

1. Разработанная экспериментальная методика на длине волны 0,154 нм обеспечивает прецизионные измерения поверхностного распределения значений коэффициентов отражения (пропускания), брэгговских углов и кривых качания. МРЗ могут иметь изогнутую форму и градиентное распределение периода по поверхности. Методика может применяться для изучения микрошероховатости плоских поверхностей.

2. Методики, развитые на основе анализа угловых зависимостей интенсивности диффузного рассеяния и зеркального отражения жесткого рентгеновского излучения, позволяют определять ширину и структуру переходных областей, толщины и плотности пленок в многослойных структурах с произвольным профилем диэлектрической проницаемости в периоде.

3. Короткопериодные W/V<sub>4</sub>C МРЗ представляют собой хорошо скоррелированные по границам многослойные структуры. Перемешивание пленок вносит основной вклад в глубину переходных областей в многослойных структурах с периодами более 1 нм. При меньших периодах нарушается сплошность пленок, что приводит к резкому росту межслоевой шероховатости.

4. Разработанные на основе светосильных монохроматоров и новых рентгенооптических схем рефлектометры и экспериментальные методики обеспечивают прецизионные измерения поверхностного распределения угловых и спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания рентгенооптических элементов с произвольной формой поверхностей в диапазоне длин волн 0,6-25 нм.

5. Коэффициент конверсии энергии электронного пучка в энергию флуоресценции L-линии кремния в окрестности 13,5 нм при бомбардировке 10 кэВ электронами мишени кремния составил

$(3,04 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}\%$ . Применение многослойной мишени Zr/Si позволяет увеличить коэффициент конверсии в 2 раза.

6. Применение ионной очистки мишеней, анодов, на которых установлено до 8-ми мишеней из различных материалов, и материалов термокатода с низкой работой выхода в совокупности позволило создать на базе разборной рентгеновской трубки эффективные источники МР и ЭУФ излучения по основным техническим характеристикам превосходящие мировые аналоги.

7. Распад переходного слоя в Ni/C и Co/C МРЗ в процессе термического отжига начинается на границах и сопровождается распространяющейся вглубь металлического слоя волной кристаллизации металла с вытеснением из металлической матрицы атомов углерода. Повышение температуры отжига приводит к объемной кристаллизации металла и росту межслоевой шероховатости. Оптимальной, с точки зрения коэффициента отражения, температурой отжига являются та, при которой кристаллизация металла происходит на границах металл-углерод.

8. Развитые принципы оптимизации оптических элементов спектрометров на основе многослойных рентгеновских зеркал позволили разработать высокоэффективные приборы для диагностики высокотемпературной и низкотемпературной плазмы.

9. Источник на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой формирует сферическую волну с рекордно низкой абберацией, что позволило создать на его основе дифракционный интерферометр для изучения формы светосильных поверхностей и волновых деформаций оптических систем с субнанометровой точностью.

10. Развитая комплексная методика коррекции формы оптических элементов, основанная на применении вакуумного напыления и ионно-пучкового травления, обеспечивает изготовление атомарно гладких подложек, включая асферические, с субнанометровой точностью формы поверхности.

### **Личный вклад автора**

Автору принадлежит идеология новых физических методов, экспериментальных методик и экспериментов, описанных в диссертации. При его определяющем участии были проведены разработка, отладка и запуск в эксплуатацию установок и приборов.



Он участвовал во всех этапах исследований: в постановке задачи, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке и оформлении полученных результатов к публикации. Разработка модели диффузного рассеяния рентгеновского излучения и обработка экспериментальных данных, описанные в [A40, A49, A51], исследование флуоресценции твердых тел под воздействием быстрых электронов [A50, A53, A56, A64, A66, A69] и коррекция формы зеркал [A62, A65, A76] были проведены при участии А.Е. Пестова. Работы по интерферометрии оптических поверхностей, дифракции света на отверстиях и источникам сферической волны [A60, A51, A62, A65, A71, A72, A76] были сделаны при участии М.Н. Торопова. Рефлектометр и исследования, проведенные с его помощью, описанные в работах [A27, A32, A35, A38, A44], были проведены при участии С.Ю. Зуева. Изучение свойств МРЗ с флуктуирующими параметрами и несимметричной элементарной ячейкой [A48, A55] было проведено совместно с М.М. Барышевой. Исследования внутренней структуры МРЗ методом EXAFS спектроскопии, [A7, A8, A16], были проведены совместно с В.А. Черновым.

### **Апробация работы**

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на российских и международных конференциях: Всесоюзное Совещание по «Диагностике Высокотемпературной Плазмы» (1990 Минск, 1992 Санкт-Петербург), International Conference on «Synchrotron Radiation Instrumentation» (1991 Chester, Англия), Международная Конференция: «Нанотехнология, Наноэлектроника и Криоэлектроника НК-92» (1992 Барнаул), International Conference on «Vacuum Ultraviolet Radiation Physics» (1992 Париж, Франция), International Conference «X-Ray Microscopy – 4» (1993 Черногоровка), International conference on «Radiometry» (1994 Берлин), International conference on «Synchrotron Radiation Sources» (1995 Kyongji, Корея), International Conference on «Application of Diamond Films and Related Materials» (1995 Gathersburg, Maryland США), Всероссийское Совещание «Рентгеновская оптика» (1998, 2002, 2003, 2004 Нижний Новгород), Российской Конференции по «Использованию Синхротронного Излучения» (1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 Новосибирск), International Conference “Micro- and nanoelectronics” (2003, 2005,

2007 г. Звенигород), International Workshop «SEMATECH EUV Source» (2003, Santa Clara California США), Национальная Конференция по «Применению Рентгеновского, Синхротронного излучений, Нейтронов и Электронов для исследования материалов» (2003, 2007 Москва), International «Extreme Ultraviolet» (2003 Antwerp, Belgium), International Conference on «Physics of X-Ray Multilayer Structures» (2004 Sapporo, Japan), Рабочее совещание по Программе отделения физических наук РАН «Новые материалы и структуры» (2004 Нижний Новгород, 2005, 2006, 2007 Черноголовка), Симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (2005, 2006, 2007, 2008 Нижний Новгород), International Conference «Synchrotron Radiation» (2008 Новосибирск), Совещание «Рентгеновская оптика» (2008 Черноголовка).

### **Публикации по теме диссертации**

Основные результаты изложены в 59 статьях, опубликованных в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, в 8 статьях в трудах SPIE и в 11 материалах и тезисах конференций. Список трудов автора прилагается.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 401 странице и состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы (269 наименований) и списка публикаций автора по теме диссертации (78 наименований). Диссертация содержит 223 рисунка и 27 таблиц.

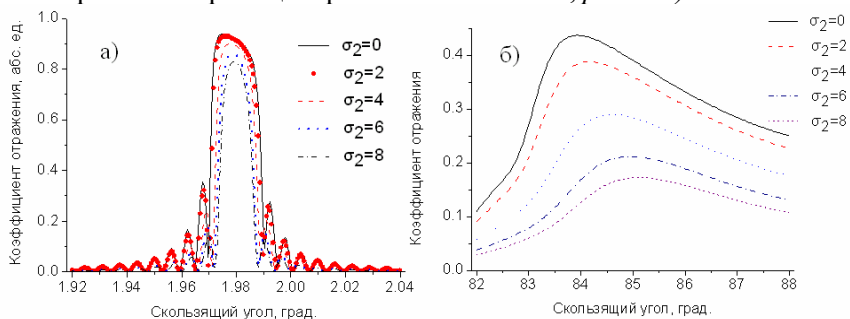
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**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 выполненных исследований.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена методам расчета отражательных характеристик МРЗ, являющихся основой для получения структурных параметров МРЗ по данным рентгеновской рефлектометрии. Расчеты выполнены с использованием модели сплошной среды по формулам рекуррентных соотношений Л. Паррата [1] и метода медленных амплитуд [2]. Слои характеризуются комплексными диэлектрическими проницаемостями, выражаемыми через атомные

факторы рассеяния и плотности, и произвольными по глубине структуры толщинами. Методом численного моделирования изучается степень влияния на отражательные характеристики таких несовершенств структуры, как межслоевая шероховатость, случайные флуктуации и систематическое изменение толщин пленок, а также отклонение плотностей пленок от табличных значений.

Одним из важных результатов данной главы является демонстрация ограниченности традиционных подходов, использующих модель симметричной элементарной ячейки при описании свойств МРЗ. Показано, что если элементарная ячейка имеет одну «идеальную» границу, то в жестком рентгеновском диапазоне коэффициенты отражения МРЗ практически не зависят от шероховатости второй границы, влияние которой сводится только к увеличению длины экстинкции рентгеновской волны в структуре и, соответственно, к некоторому увеличению селективности МРЗ, *рис. 1 а*). В МР диапазоне, из-за большого поглощения, эффект несовершенной границы проявляется сильнее, *рис. 1 б*).



**Рис. 1.** Угловые зависимости коэффициентов отражения Ni/C МРЗ, рассчитанные в окрестности первого брэгговского пика. Значения шероховатости границ, выраженные в ангстремах, приведены на рисунке. а)  $\lambda=0,154$  нм, б)  $\lambda=4,47$  нм.

Отклонение плотностей материалов пленок от табличных значений в жесткой части спектра так же сводится к увеличению длины экстинкции и, как следствие, к сложностям при восстановлении структурных параметров МРЗ по данным рефлектометрии на длине волны  $\lambda=0,154$  нм. Для определения плотности пленок в МРЗ лучше всего использовать

рефлектометрические данные в предкраевых областях поглощения материалов, составляющих МРЗ.

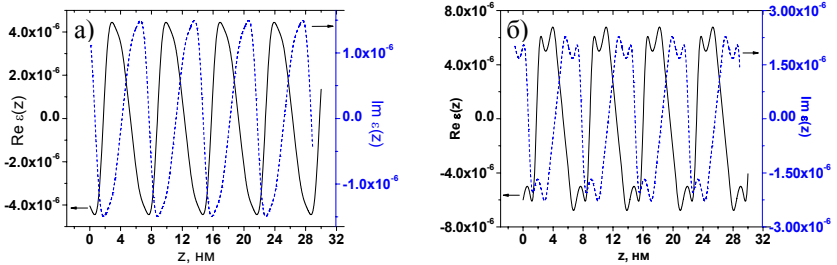
Случайные флуктуации толщин пленок вокруг средних значений  $\delta d/d \leq 1\%$  слабо влияют на пиковые значения коэффициентов отражения и полуширины кривых качания. С точки зрения восстановления внутреннего строения МРЗ это позитивный факт. С другой стороны, это обстоятельство затрудняет их экспериментальное детектирование, что оказалось серьезной проблемой с точки зрения предсказания поляризационных и фазовых характеристик МРЗ работающих «на просвет». Обнаружение систематических и скачкообразных изменений толщин пленок оказалось достаточно простой экспериментальной задачей, так как они проявляются в уширении или расщеплении брэгговских пиков.

К имеющим важное практическое значение результатам можно отнести оценку влияния различных дефектов внутренней структуры МРЗ на угловые и спектральные зависимости коэффициентов отражения и выработку соответствующих требований к характеристикам рефлектометров.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена развитию экспериментальных методов и математических моделей, используемых при восстановлении структурных параметров МРЗ по угловым зависимостям интенсивности зеркального и диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения (Обратная задача). Показаны область применения и достоинства каждой экспериментальной методики. Значительное место уделено анализу возможных случайных и систематических погрешностей определения абсолютных значений коэффициентов отражения, положения пиков отражения и полуширин кривых качания. Подробно рассмотрена проблема измерения МРЗ с градиентом периода по поверхности.

Описана экспресс-методика для восстановления профиля электронной плотности (диэлектрической проницаемости) в многослойных структурах по измеренным амплитудам гармоник разложения диэлектрической проницаемости в ряд Фурье для случая несимметричной элементарной ячейки МРЗ. На *рис. 2 а), б)* приведены профили диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(z)$  за вычетом усредненной по всей структуре  $\langle \varepsilon \rangle$  для  $\text{La}/\text{B}_4\text{C}$  МРЗ с

разными периодами, полученные по этой методике. На рисунках отчетливо видна асимметрия элементарной ячейки МРЗ. Такие профили хорошо описывают коэффициенты отражения МРЗ в МР диапазоне.



**Рис. 2.** Профили диэлектрической проницаемости,  $\varepsilon(z)$  -  $\langle \varepsilon \rangle$ , восстановленные по амплитудам Фурье-гармоник для La/B<sub>4</sub>C МРЗ: а)  $d=3,5$  нм; б)  $d=7,1$  нм.

Развивая результаты работы [3], создана новая модель, описывающая диффузное рассеяния жесткого рентгеновского излучения многослойными структурами с полной продольной корреляцией шероховатостей границ, позволяющая разделить вклады геометрической шероховатости и диффузионного перемешивания пленок в общую глубину переходной области на границах между различными материалами в многослойной структуре.

В динамическом случае для расчета угловых спектров падающего и рассеянного полей  $E_{1,p}$  и  $E_{2,p}$  решается система уравнений:

$$\begin{cases} iq_1 \frac{\partial E_{1,p}}{\partial z} - \Delta_p E_{1,p} + k_0^2 a_1 \Phi_0 E_{2,p} = -k_0^2 a_1 \sum_{p' \neq p} \Phi_{p'-p} E_{2,p'} \\ -iq_1 \frac{\partial E_{2,p}}{\partial z} - \Delta_p E_{2,p} + k_0^2 a_1 \Phi_0 E_{1,p} = -k_0^2 a_1 \sum_{p' \neq p} f_{p'-p} E_{1,p'} \end{cases}, \text{ где}$$

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

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,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения в вакууме,  $\Delta_p$  является отстройкой от условия Брэгга для рассеянных волн. Коэффициент

$a_1$  представляет собой амплитуду первой Фурье-гармоники диэлектрической проницаемости МС. С учетом перемешивания пленок

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

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

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

В кинематическом приближении получается простое выражение для интенсивности рассеянной волны:

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

в  $a_1$ , а шероховатость в  $f_p$ . При  $p=0$  (случай зеркального отражения) глубина переходной области получается в виде:  $\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_m^2}$ .

С помощью этого метода впервые изучены корреляционные свойства шероховатостей границ многослойных структур с ультракороткими,  $d \approx 1$  нм, периодами. Показана высокая степень их корреляции. Как и для структур с «большими» периодами, для них наблюдается резонансное диффузное рассеяние. Эти исследования позволили диагностировать потерю сплошности пленками металла в короткопериодных МРЗ.

Развита методика измерений и технология полирования подложек для рентгенооптики с шероховатостями поверхностей на атомарном уровне. Приводятся данные по шероховатостям, полученным при полировании различных материалов, и сравнение достигнутого качества с мировым уровнем.

Описанные в данной главе методики являются штатными в ИФМ РАН и широко применяются в научных исследованиях.

**Третья глава** посвящена проблемам рефлектометрии в МР и ЭУФ диапазонах. В отличие от жесткого диапазона, для данной спектральной области отсутствует стандартное оборудование, позволяющее проводить эти исследования в лаборатории, поэтому основные работы в этой области сконцентрированы в нескольких мировых синхротронных центрах. Немногочисленные лабораторные рефлектометры отличаются скромными техническими

характеристиками и по ряду параметров не удовлетворяют современным требованиям [4].

В начале главы обсуждаются основные проблемы лабораторной рефлектометрии. Описываются развитые в ходе выполнения диссертационной работы физические принципы построения рефлектометров для МР и ЭУФ диапазонов. Приводится описание и основные характеристики разработанных рефлектометров. Особое внимание уделяется методам тестирования основных характеристик приборов, включая точность измерений абсолютных значений коэффициентов отражения, положения и полуширин брэгговских пиков, поляризационных свойств зондового пучка. Большое внимание уделено особенностям исследования короткопериодных зеркал. Приводится фактический материал по отражательным характеристикам МРЗ на основе большого ряда пар материалов.

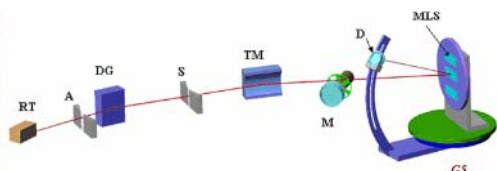
На примере двух светосильных рефлектометров показана эффективность применения специализированных приборов, имеющих некоторый «базовый» набор функций, для решения специальных задач. В частности, с их помощью в лабораторных условиях была достигнута точность измерений, характерная для рефлектометров, работающих на синхротронах. При этом сохраняются основные преимущества лабораторного прибора: доступность, оперативность, малые габаритные размеры и низкая стоимость. При необходимости эти приборы могут быть легко встроены в аналитико-технологические комплексы по типу «нанофабов». Приводятся примеры применения этих приборов для научных исследований.

В конце главы описываются детекторная система и разборные рентгеновские трубки, являющиеся ключевыми элементами, определяющими технические характеристики рефлектометров. Благодаря применению ряда физико-технических решений разработанные рентгеновские трубки существенно превзошли мировой уровень по основным характеристикам.

Основные результаты, полученные в этой главе можно сформулировать следующим образом.

- Разработан и изготовлен ряд лабораторных рефлектометров, обеспечивших изучение всех без исключения типов элементов рентгеновской оптики в диапазоне длин волн 0,6-25 нм. Изучены особенности аттестации различных рентгенооптических элементов,

созданы соответствующие экспериментальные методики. На *рис. 3* приведена фотография и рентгенооптическая схема рефлектометра последнего поколения.



RT – рентгеновская трубка; A, S – входная и выходная щели монохроматора; DG – дифракционная решетка; TM – торонд; M, D – детекторы; MLS – исследуемые образцы; G5 – пятиосный гониометр

**Рис. 3.** Фотография и рентгенооптическая схема универсального рефлектометра с решеточным монохроматором.

- Для экспериментов, требующих неподвижного положения щелей монохроматора, например, при работе с синхротронами, разработан решеточный спектрометр по схеме Черни-Тюрнера, перекрывающий 2-мя наборами дифракционных решеток и коллимирующих зеркал диапазон длин волн 0,8-20 нм.

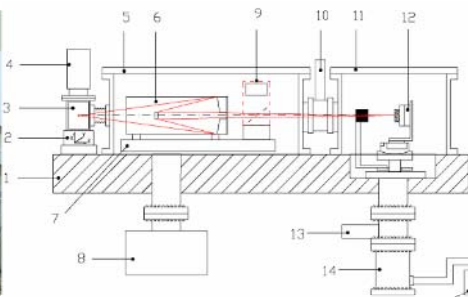
- Разработаны специализированные рефлектометры (*рис. 4*) обеспечивающие точность измерений коэффициентов отражения и пропускания элементов рентгенооптики на уровне 0,1%, а также проведение исследований чувствительности детекторов и фоторезистов.

- Измерен коэффициент конверсии энергии электронов в энергию флуоресценции линии Si  $L_{\alpha}$  при облучении кремниевой мишени электронами с энергией 10 кэВ. Показана возможность его увеличения в 2 раза за счет введения прослоек «тяжелого» металла.

- Разработаны разборные рентгеновские трубки, являющиеся источниками излучения в МР и ЭУФ диапазонах для различных приложений. Благодаря ряду решений, включая применение ионного источника для очистки мишеней, по своим техническим характеристикам они превосходят мировые аналоги.

- Разработана универсальная детекторная система, предназначенная для регистрации МР и ЭУФ излучения, а также частиц, вызывающих вторичную электронную эмиссию, в режиме счета единичных событий. Электроника обеспечивает скорость регистрации до  $10^6$  регистрируемых событий в секунду при сохранении линейности на уровне 1%.

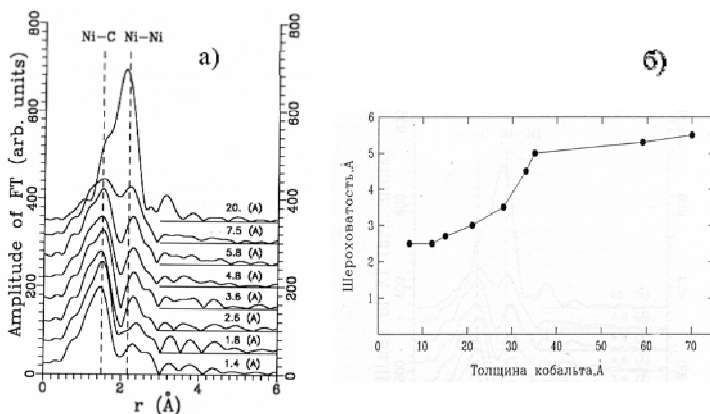




**Рис. 4.** Фотография и схема специализированного рефлектометра с монохроматором на основе объектива Шварцшильда. 1 – точная оптическая плита; 3 – рентгеновская трубка; 6 – сферический объектив Шварцшильда; 11 – камера для исследуемых образцов; 12 – пятиосный гониометр.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена исследованию микроструктуры углеродосодержащих (Ni/C и Co/C) МРЗ и физических процессов, происходящих в них при температурном отжиге. Актуальность этих исследований связана с тем, что традиционные методы малоуглового рассеяния жесткого рентгеновского излучения не позволяют экспериментально определить ни микроструктуру пленок, ни механизмы их роста. Помимо общих, существовали и конкретные физические проблемы, связанные с различными объяснениями рядом авторов физических процессов, проходящих в углеродосодержащих структурах в процессе термического отжига [5].

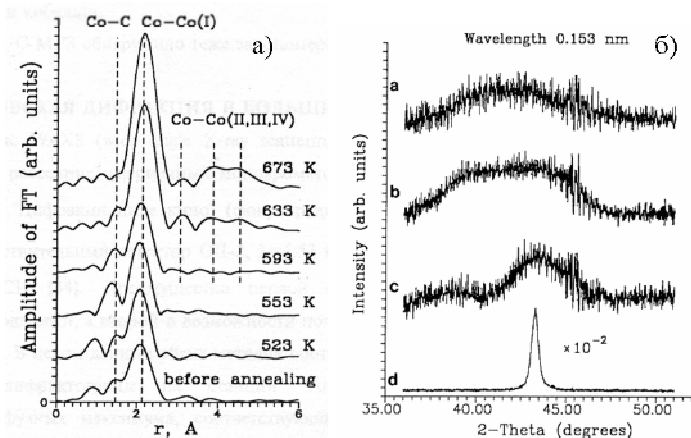
Для решения этих проблем в диссертации использовалась комплексная методика изучения МРЗ, включающая малоугловое SAXS (small angle X-ray scattering), широкоугловое WAXS (wide angle X-ray scattering) рассеяние жесткого рентгеновского излучения, а также EXAFS (extended X-ray absorption fine structure) спектроскопию. SAXS чувствительно к геометрическим характеристикам многослойных структур, параметрам межслоевых границ и плотностям материалов. Угловые спектры WAXS несут информацию о микроструктуре материалов пленок, а EXAFS – о микроструктуре пленок и ближайшем окружении выбранных атомов. Эксперименты проводились на синхротроне ВЭПП-3, Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.



**Рис. 5.** Кривые PPA вокруг Ni в Ni/C МРЗ – а) и зависимость шероховатости – б) от толщины слоя Ni (Co) при толщине С 3 нм.

На *рис. 5 а)* приведены кривые радиального распределения атомов (PPA) вокруг никеля, полученные по данным EXAFS спектроскопии в Ni/C МРЗ с различной толщиной напыляемого металла. Исходя из приведенных экспериментальных данных, включая результаты исследований SAXS (*рис. 5 б)*) можно предложить следующую модель формирования переходных слоев и микроструктуры слоев металла в процессе роста МРЗ. Первоначально, по мере напыления, атомы металла внедряются в углеродную пленку без образования пленки металла. При этом период МРЗ слабо увеличивается. В кривых PPA наблюдается доминирование Me-C взаимодействия. При нанесении эквивалентной толщины металла 0,4-0,5 нм начинается резкий рост Me-Me взаимодействия, означающий начало роста металлической пленки. До толщины 2-2,5 нм она имеет аморфную структуру, которая способствует «гладкости» переходных границ. При дальнейшем увеличении толщины металла начинается его кристаллизация, сопровождаемая появлением высших координационных сфер взаимодействия на кривых PPA и увеличением микрошероховатости переходных границ. При толщине слоев металла около 5 нм они становятся полностью кристаллическими, что проявляется в стабилизации микрошероховатости границ при последующем увеличении толщины металла. Эксперименты со стоячими волнами [A14]

полностью подтвердили описанную модель формирования переходных слоев в Ni/C МРЗ.



**Рис. 6.** Кривые PPA вокруг Ni в Ni/C МРЗ (а) и рентгеновские диффрактограммы (б) при различных температурах отжига.

Динамику кривых PPA и дифрактограмм с ростом температуры отжига иллюстрируют *рис. 6 а), б)*. Эти данные в совокупности с результатами SAXS измерений позволили объяснить наблюдаемые физические явления, сопровождающие отжиг Ni(Co)/C МРЗ в рамках модели автокаталитического расслоения металла и углерода на границах, сопровождающегося кристаллизацией металла и, по-видимому, графитизацией углерода на границах. Повышение температуры отжига приводит к объемной кристаллизации металла, сопровождающейся ростом оптического контраста и межслоевой шероховатости на границах.

Эксперименты, проведенные с помощью атомов «меток» [A16], подтвердили доминирующую роль процессов на межслоевых границах, определяющих характер поведения микроструктуры, коэффициентов отражения и толщины пленок в процессе термического отжига. Наряду с пониманием сложных физических явлений, сопровождающих рост и термический отжиг углеродосодержащих МРЗ, эти исследования внесли значительный вклад и в методологию изучения многослойных структур, продемонстрировав возможности EXAFS-спектроскопии для изучения переходных слоев и микроструктуры пленок в МРЗ.

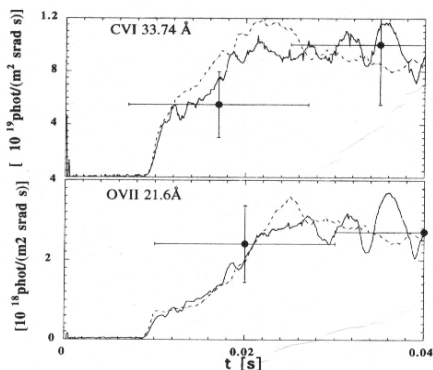
**Пятая глава** диссертационной работы посвящена спектрометрам на основе МРЗ для рентгеновской диагностики плазмы. В последние годы, благодаря ряду уникальных свойств, МРЗ стали основой при разработке спектральной аппаратуры для рентгеновской диагностики плазмы. Учитывая широчайший диапазон характеристик плазменных объектов и потенциальные возможности многослойной рентгеновской оптики для эффективного решения конкретных задач, назрела необходимость выработки общих принципов и подходов при проектировании спектрометров, использующих МРЗ в качестве дисперсионных элементов.

В диссертации рассматриваются принципы построения спектрометров и способы оптимизации их основных элементов (зеркала, отрезающие фильтры, коллиматоры и детекторы) в зависимости от конкретных задач. Приводится описание ряда спектрометров, разработанных автором и нашедших применение в ряде отечественных и зарубежных лабораторий.

Преимущество МРЗ по сравнению с дифракционной решеткой иллюстрирует рис. 7, на котором приведены типичные осциллограммы линий ионов примесей углерода и кислорода, наблюдаемые в эксперименте (сплошные линии), результаты моделирования (прерывистые линии) и экспериментальные данные, полученные с помощью спектрометра скользящего падения (кружки). Вертикальные усы на графиках показывают погрешность калибровки решеточного спектрометра McPherson, горизонтальные – время интегрирования сигнала (20 мсек.). Из приведенных рисунков можно сделать два вывода. Во-первых, в пределах экспериментальной ошибки, данные калибровки, выполненной автором, совпали с результатами независимых измерений. Во-вторых, наглядно продемонстрировано преимущество спектрометра на основе МРЗ над спектрометрами, использующими в качестве дисперсионных элементов дифракционные решетки. Измерения были проведены на термоядерной установке RFX (г. Падуя, Италия).

Распространение идеологии дуохроматора на область МР и ЭУФ излучения выявило ряд проблем, связанных со значительным нерезонансным отражением многослойными зеркалами длинноволновой части ЭУФ излучения, низкой спектральной селективностью зеркал и вкладом второго порядка отражения от

МРЗ в сигнал детектора. Решение этих задач потребовало поиска новых пар материалов для МРЗ, композитных фильтров и оптимизации детекторов [A20, A24].



**Рис. 7.** Динамика линий примесей углерода CVI ( $\lambda=3,374$  нм) и кислорода OVII ( $\lambda=2,16$  нм). Прерывистые линии – расчет; сплошные линии – измерения с помощью МРЗ; кружки – измерения с помощью спектрометра McPherson.

Работы по источникам излучения для проекционной ЭУФ нанолитографии потребовали разработки универсального, малогабаритного и эффективного измерителя мощности излучения со спектральной полосой пропускания, совпадающей с полосой пропускания оптической системы. Учитывая многообразие схем, прибор должен легко адаптироваться к изменению полосы пропускания в широких пределах. В рамках диссертационной работы был разработан прибор, вместивший в себя основные достижения в области создания многослойных зеркал [A32] и отрезающих фильтров [A63] в ИФМ РАН. Главной особенностью данного прибора является использование в качестве монохроматора двух многослойных зеркал, что позволило управлять спектральной полосой прибора в широких пределах при сохранении рекордной общей эффективности регистрации.

Оптическая схема и фотография прибора приведены на *рис.8*. Вращающийся диск с диафрагмами обеспечивает широкий динамический диапазон по мощности регистрируемого излучения. Установка на диск фильтров с известной спектральной полосой пропускания позволяет расширить спектральный диапазон прибора до видимого. К настоящему времени в различных лабораториях мира работает около 10 таких приборов. Они используются как эталонный инструмент для аттестации различных источников ЭУФ излучения.



**Рис. 8.** Рентгенооптическая схема и фотография измерителя ЭУФ мощности с блоком питания и контроллером управления.

**Шестая глава** посвящена развитию интерферометрических методов аттестации и коррекции формы подложек для рентгеновской оптики с субнанометровой точностью. Согласно критерию Марешаля [6] для достижения дифракционного предела разрешающей способности оптической системы корень квадратный из среднеквадратической аберрации (деформации) объектива ( $RMS_{obj}$ ) должен удовлетворять соотношению  $RMS_{obj} \leq \lambda / 14$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения. Для оптической системы с числом элементов  $N$  допустимая ошибка на один элемент  $RMS_i$  составляет  $RMS_i \leq \lambda / (14 \cdot \sqrt{N})$ . Для 6-ти зеркального проекционного объектива нанолитографа на длину волны  $\lambda = 13,5$  нм она не превышает 0,4 нм. А с учетом требований к контрасту литографического процесса эта величина составляет около 0,2 нм. С укорочением длины волны проекционной литографии до  $\lambda = 6,7$  нм требования к точности формы зеркал ужесточаются до 0,1 нм. Этот же уровень точностей требуется для рентгеновской микроскопии и астрономии сверхвысокого разрешения.

Традиционные интерферометрические методы аттестации и технологии полирования оптических поверхностей гарантируют точность изготовления формы поверхности примерно на 2 порядка хуже, что сдерживало развитие отечественных программ по нанолитографии, рентгеновской микроскопии и астрономии сверхвысокого разрешения.

В рамках данной работы были изучены основные ограничения точности измерений традиционных интерферометров с дифракционной волной сравнения, которые для формирования эталонной сферической волны используют точечное отверстие в непрозрачном экране [7]. В частности, показано, что источниками

деформаций фронта являются взаимодействие вторичных волн с материалом экрана, неидеальность формы отверстия, aberrации первичной оптики и погрешности юстировки.

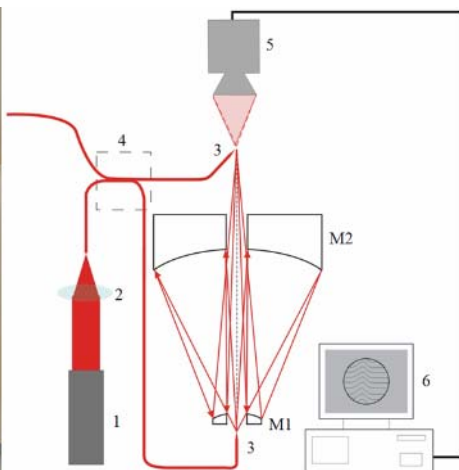


Рис. 9. Фотография и оптическая схемы интерферометра для аттестации объективов: 1– лазер, 2 – линза, 3 – источники сферической волны, 4 –делитель пучка, 5 – CCD камера, M1 и M2 – исследуемый объектив, 6 – PC.

Для решения этих проблем был предложен новый источник эталонной сферической волны на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой [A67, A72]. На его основе создан вакуумный дифракционный интерферометр (рис. 9). На рис. 10 приведены результаты сравнения точности измерений, обеспечиваемой разработанным в диссертации интерферометром и интерферометром, установленном на синхротроне ALS (Беркли, США) и считающимся эталоном точности.

Как видно из рисунка, разработанный в диссертации интерферометр обеспечивает точность измерений волновых деформаций оптики лучше 0,1 нм ( $\lambda/6000$  в длинах волн интерферометра) при рекордных числовых апертурах, превосходящих более чем в 2 раза мировой уровень.

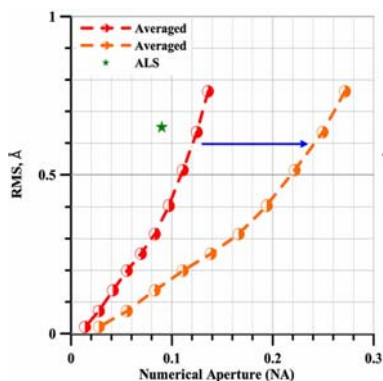


Рис. 10. Сравнение точности измерений интерферометров, разработанных в данной работе (кривые с символами) и на ALS (звездочка) в зависимости от числовой апертуры. Левая кривая соответствует измерениям без учета различий в геометрии экспериментов в ИФМ и на ALS; правая – с учетом.

Разработанные в диссертации методы изучения формы оптических поверхностей явились основой для развития коррекции формы светосильных подложек для рентгеновских зеркал с субнанометровой точностью. В диссертации на базе технологий вакуумного напыления и ионно-пучкового травления разработаны методы коррекции, обеспечивающие точность формы на уровне 0,3-0,5 нм. Найдены методы закрепления сверхточных подложек в механические оправы без деформации их поверхностей.

Основным результатом данной главы можно считать создание физических и технологических основ для развития сверхточной оптики, включая рентгеновскую, в стране.

### **Основные результаты работы:**

1. Созданы экспериментальные методики для прецизионного изучения локально по поверхности угловых зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и рассеяния жесткого рентгеновского излучения, позволяющие восстановить структурные параметры МРЗ по данным рефлектометрии. Образцы могут иметь изогнутую форму и переменное, с градиентом до 0,1 нм/мм, распределение периода по поверхности зеркала.
2. Разработан ряд лабораторных рефлектометров и созданы экспериментальные методики для прецизионного изучения угловых и спектральных зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и рассеяния МР и ЭУФ излучения ( $\lambda \in 0,6-25$  нм) практически всех типов элементов рентгеновской оптики. Образцы могут иметь произвольную форму и переменное, с градиентом до 0,1 нм/мм, распределение периода по поверхности зеркала. По



основным техническим характеристиками приборы не уступают, а по ряду параметров и превосходят аналоги, существующие в единичных экземплярах в мире.

3. Предложен и изучен новый способ формирования дифракционной сферической волны на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой. Этот источник имеет рекордно низкую деформацию дифракционной волны в большой апертуре. На базе этого источника разработан интерферометр для изучения формы светосильных поверхностей и волновых деформаций оптических систем с субнанометровой точностью. По основным техническим характеристикам он превосходит мировые аналоги. Разработаны экспериментальные методики для аттестации волновых деформаций широкого класса оптических элементов и систем, включая асферические поверхности, с субнанометровой точностью.

4. Разработаны методы получения атомарно гладких светосильных подложек для рентгенооптики, включая асферические, с субнанометровой точностью формы поверхности, что заложило физико-технологические основы для развития в стране таких научных и технологических дисциплин как рентгеновская микроскопия, астрономия и проекционная нанолитография сверхвысокого разрешения.

5. На основе анализа угловых зависимостей интенсивности диффузного рассеяния и зеркального отражения рентгеновского излучения развита методика, позволившая в случае полной продольной корреляции межслойных границ в многослойных структурах разделить вклады геометрической шероховатости и диффузионного перемешивания пленок в общую глубину переходной области на границах между различными материалами. Детально изучено внутренне строение и корреляционные свойства шероховатостей границ W/B<sub>4</sub>C МРЗ с ультракороткими ( $d \approx 1$  нм) периодами. Показана высокая степень их корреляции и доминирующий характер перемешивания материалов пленок над ростовыми процессами при формировании переходных областей.

6. Методом EXAFS-спектроскопии изучены переходные слои и микроструктура металлических пленок в зависимости от количества металла в периоде и от температуры отжига углеродосодержащих МРЗ.

7. Разработаны методики построения спектрометров для диагностики плазмы, использующих МРЗ в качестве дисперсионных элементов МР и ЭУФ диапазонов. Предложены методы оптимизации элементов спектрометра. Экспериментально доказана их эффективность. Разработанные спектрометры нашли применение, как в России, так и за рубежом.

8. Ионная очистка мишеней, многомишенные аноды и материалы термокатода с низкой работой выхода позволили создать на базе разборной рентгеновской трубки эффективные источники МР и ЭУФ излучения по основным техническим характеристикам превосходящие мировые аналоги. Источники нашли широкое применение для рефлектометрии, метрологии, калибровки детекторов и фоторезистов, спектральной аппаратуры МР и ЭУФ диапазона, а также для ЭУФ нанолитографии.

9. Изучена динамика коэффициента конверсии энергии электронов в энергию флуоресценции линии Si  $L\alpha$  при облучении кремниевой мишени электронами в зависимости от параметров электронного пучка и угла выхода излучения. Показана возможность увеличения этого коэффициента почти в 2 раза за счет введения в мишень прослоек «тяжелого» металла.

#### **Список цитируемой литературы**

[1] Parrat, L.G. Surface studies of solids by total reflection of X-rays / L.G. Parrat // Phys. Rev. - 1954. - V.95.No.4 - P.359-369.

[2] Виноградов, А.В. Зеркальная рентгеновская оптика / А.В. Виноградов, И.А. Брытов, Ф.Я. Грудский, М.Т. Коган, И.В. Кожевников, В.А. Слемзин; под общей ред. А.В. Виноградова // Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ние. - 1989. - 463 с.

[3] Fraerman, A.A. The effect of interfacial roughness of the reflection properties of multilayer X-ray mirrors / A.A. Fraerman, S.V. Gaponov, V.M. Genkin, N.N. Salashchenko // Nuclear instr. and methods in physics research A. - 1987. - V.261. - P.91-98.

[4] Gillikson, E.M. A soft X-ray/EUV reflectometer based on a laser produced plasma source / E.M. Gillikson, J.H. Underwood, P.C. Batson, V. Nikitin // Journal of x-ray science and technology. - 1992. - V.3. - P.283-299.

[5] Akhsakhalyan, A.D. Diffusion in multilayer structures of superthin films metal-carbon / A.D. Akhsakhalyan, A.A. Fraerman, Yu.Ya.

Platonov, N.I. Polushkin, N.N. Salashchenko // Thin Solid Films. - 1992. - V.207. - P.19-23.

[6] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. Пер. с англ. // М.: Наука. - 1973. - Изд.2.

[7] Линник, В.П. Простой интерферометр для тестирования оптических систем // Известия академии наук СССР. - 1933. - №1. - С.210-212.

### **Список публикаций автора**

[A1] Бурмасов В.С., Первые эксперименты на установке ГОЛ-М / В.С. Бурмасов, И.В. Кандауров, В.А. Капитонов, Э.П. Кругляков, О.И. Мешков, А.Л. Санин, Н.И. Чхало // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез. - 1987. - Вып.2. - С.31-34.

[A2] Kruglyakov, E.P. Multilayer Ti-Be- interference structures for ultrasoft X-ray radiation prepared by pulsed laser sputtering / E.P. Kruglyakov, M.V. Fedorchenko, A.L. Fedorov, N.I. Chkhalo // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1991. - V.308. - P.325-326.

[A3] Кругляков, Э.П. Многослойные зеркала для мягкого рентгеновского излучения / Э.П. Кругляков, М.В. Федорченко, Н.И. Чхало // Физика плазмы. - 1992. - Т.18.Вып.4. - С.482-484.

[A4] Renner, O. Properties of laser-sputtered Ti/Be multilayers / O. Renner, M. Kopecky, E. Krousky, F. Schafers, B.R. Muller, N.I. Chkhalo // Review of Scientific Instruments. - 1992. - V.63.No.1. - P.1478-1481.

[A5] Горбовский, А.И. Лазерно-плазменный источник мягкого рентгеновского излучения для калибровки спектральной аппаратуры / А.И. Горбовский, Э.П. Кругляков, М.В. Федорченко, Н.И. Чхало // Физика плазмы. - 1994. - Т.20.Вып.1. - С.98-100.

[A6] Анашин, В.В. Сверхвысоковакуумная автоматизированная установка для лазерного напыления многослойных структур / В.В. Анашин, И.Е. Валька, Н.Г. Гаврилов, Э.П. Кругляков, М.В. Федорченко, Н.И. Чхало // Приборы и техника эксперимента. - 1995. - № 4. - С.177-184.

[A7] Chernov, V.A. Study of the Inner Structure of Co/C and Ni/C Multilayers Prepared by Pulsed Laser Evaporation Method / V.A. Chernov, N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, E.P. Kruglyakov, S.V. Mytnichenko, S.G. Nikitenko // Journal of X-Ray Science and Technology. - 1995. - V.5. - P.65-72.

- [A8] Chernov, V.A. Structural Changes Study of Co/C and Ni/C Multilayers upon Annealing / V.A. Chernov, N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, E.P. Kruglyakov, S.V. Mytnichenko, S.G. Nikitenko // Journal of X-Ray Science and Technology. - 1995. - V.5. - P.389-395.
- [A9] Chkhalo, N.I. The station for detector calibration in the soft X-ray range at the VEPP-2M storage ring / N.I. Chkhalo, A.V. Evstigneev, M.A. Kholopov, V.V. Lyakh, A.D. Nikolenko, V.F. Pindyurin, A.N. Subbotin // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.440-444.
- [A10] Chkhalo, N.I. Status of X-ray mirror optics at the Siberian SR Centre / N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, N.V. Kovalenko, E.P. Kruglyakov, A.I. Volokhov, V.A. Chernov, S.V. Mytnichenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.121-126.
- [A11] Chkhalo, N.I. Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors / N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, E.P. Kruglyakov, A.I. Volokhov, K.S. Baraboshkin, V.F. Komarov, S.I. Kostyakov, E.A. Petrov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.155-156.
- [A12] Chkhalo, N.I. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: new type of mirrors for intense synchrotron radiation beams / N.I. Chkhalo, M.V. Fedorchenko, A.V. Zarodyshev, V.A. Chernov, V.I. Kirillov, A.A. Nikiforov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.127-130.
- [A13] Chernov, V.A. Fabrication and performance characteristics of a Ni/C multilayer grating for hard X-rays / V.A. Chernov, N.I. Chkhalo, N.V. Kovalenko, S.V. Mytnichenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.138-140.
- [A14] Chernov, V.A. The application of the X-ray standing wave method for study Ni/C layered structures obtained by laser-assisted deposition / V.A. Chernov, N.I. Chkhalo, I.P. Dolbnya, K.V. Zolotarev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.175-177.
- [A15] Baryshev, V.B. X-ray fluorescence analysis of a surface oriented at the Bragg angle to the exciting radiation beam / V.B. Baryshev, N.I. Chkhalo, V.I. Kondratyev, G.N. Kulipanov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1995. - V.359. - P.310-311.
- [A16] Chernov, V.A. Evolution of Interface Structure in Ni-C Multilayers Depending on Annealing Temperature: Use of Embedded Co

Sublayers-Markers / V.A. Chernov, N.I. Chkhalo, S.G. Nikitenko // Journal de Physique 4 France 7. - 1997. - C2-699-C2-700.

[A17] Carraro, L. The ultra-soft x-ray multilayer mirror-based duochromator for the reverse field pinch experiment / L. Carraro, M.E. Puiatti, P. Scarin, M. Valisa, N. Chkhalo, E.P. Kruglyakov // Review of Scientific Instruments. - 1997. - V.68.No.1. - P.1043-1046.

[A18] Chkhalo, N.I. Reflectometer for precision tests of optical components in the ultrasoft X-ray range / N.I. Chkhalo, A.N. Kirpotin, E.P. Kruglyakov, E.P. Semenov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1998. - V.405. - P.393-395.

[A19] Chernov, V.A. X-ray performance of multilayer gratings: recent advantages at SSRC / V.A. Chernov, V.I. Erofeev, N.I. Chkhalo, N.V. Kovalenko, S.V. Mytnichenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1998. - V.405. - P.310-318.

[A20] Chkhalo, N.I. Optimization of optical components of spectrometers based on multilayer mirrors for soft X-ray radiation / N.I. Chkhalo, E.P. Kruglyakov, E.P. Semenov // Plasma Devices and Operation. - 1999. - V.7. - P.123-132.

[A21] Erofeev, V.I. High resolution instruments based on X-ray multilayer gratings / V.I. Erofeev, N.V. Kovalenko, E.P. Kruglyakov, O.K. Myskin, N.I. Chkhalo // Plasma Devices and Operation. - 1999. - V.7. - P.173-180.

[A22] Коваленко, Н.В. Оптика многослойных рентгеновских решеток применительно к синхротронному излучению / Н.В. Коваленко, Н.И. Чхало, В.И. Ерофеев, В.А. Чернов, С.В. Мытниченко // Поверхность. - 1999. - №1. - С.124-129.

[A23] Волохов, А.И. Подложки для многослойных рентгеновских зеркал / А.И. Волохов, Э.П. Кругляков, Н.И. Чхало // Поверхность. - 1999. - №1. - С.130-132.

[A24] Кругляков, Э.П. Спектрометры на основе многослойных рентгеновских зеркал для диагностики высокотемпературной плазмы / Э.П. Кругляков, А.Д. Николенко, Е.П. Семенов, Е.Д. Чхало, Н.И. Чхало // Поверхность. - 1999. - №1. - С.151-154.

[A25] Akhsakhalyan, A.D. Method for manufacturing of double-bent X-ray optics / A.D. Akhsakhalyan, N.I. Chkhalo, A.I. Kharitonov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2001. - V.470. - P.142-144.

[A26] Shmaenok, L.A. Multilayer based instrumentation developments for EUVL source metrology / L.A. Shmaenok, N.N. Salashchenko, N.I.

Chkhalo, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev, I.A. Kaskov, E.B. Klyuenkov, V.L. Sukhanov, V.V. Zabrodsky, V.P. Belik // Proceedings of International SEMATECH EUV Source Workshop, Santa Clara California, USA, February 23, 2003.

[A27] Бибишкин, М.С. Рефлектометрия в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №1. - С.70-77.

[A28] Ахсахалян, А.А. Особенности изготовления короткофокусных рентгеновских цилиндрических отражающих систем / А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, М.С. Бибишкин, Б.А. Володин, Е.Б. Клюенков, В.А. Муравьев, Н.Н. Салащенко, А.И. Харитонов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №1. - С.81-85.

[A29] Бибишкин, М.С. Определение микрошероховатости поверхностей с помощью мягкого рентгеновского излучения / М.С. Бибишкин, С.Ю. Зуев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №1. - С.94-96.

[A30] Бибишкин, М.С. Новая разборная трубка для мягкого рентгеновского излучения / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №2. - С.41-45.

[A31] Бибишкин, М.С. Характеристики детекторов на основе МКП и каналовых умножителей при работе в счетном режим / М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - №7. - С.5-8.

[A32] Andreev, S.S. Multilayer optics for XUV spectral region: technology fabrication and applications / S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, E.B. Kluenkov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.Yu. Zuev // Central European Journal of Physics 1. - 2003. - P.191-209.

[A33] Andreev, S.S. Short-period multilayer X-ray mirrors / S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, E.B. Kluenkov, K.A. Prokhorov,

N.N. Salashchenko, M.V. Zorina, F. Schafers, L.A. Shmaenok // Journal of Synchrotron Radiation. - 2003. - V.10.No.5. - P.358-360.

[A34] Shmaenok, L.A. Novel instrumentation for in- and out of band metrology of EUVL sources / L.A. Shmaenok, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo, E.B. Kluev, A.Yu. Lopatin, K.A. Prokhorov, V.L. Sukhanov, V.V. Zabrodsky, V.P. Belik, V.Y. Banine // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Extreme Ultraviolet Symposium, Antwerp, Belgium, September 30-October 2, 2003.

[A35] 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, Rusutsu Resort, Sapporo, Japan, March 7-11, 2004. - 07-02.

[A36] 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. Салащенко, Д.П. Чехонадских, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Известия академии наук. Серия физическая. - 2004. - Т.68.№ 4. - С.560-564.

[A37] Андреев, С.С. Поляризаторы и фазовращатели на основе многослойных зеркал и свободновисящих пленок для диапазона длин волн излучения 2.1-4.5 нм / С.С. Андреев, М.С. Бибишкин, Х. Кимура, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, К.А. Прохоров, Н.Н. Салащенко, Т. Хироно, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Известия академии наук. Серия физическая. - 2004. - Т.68.№4. - С.565-568.

[A38] Bibishkin, M.S. Laboratory methods for investigation of multilayer mirrors in Extreme Ultraviolet and Soft X-Ray region / M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chkhalo, E.B. Klyuenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev // Proceedings of SPIE, 2004. - V.5401 - P.8-15.

[A39] Гапонов, С.В. Работы в области проекционной EUV-литографии в рамках российской программы / С.В. Гапонов, Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало, В.Е. Костюков, Л.А. Синегубко, В.Д. Скупов, А.Ю. Седаков // Материалы симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 25-29 марта 2005. - Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. - Т.1. - С.44-47.

[A40] 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. Салашченко, А.А. Фраерман, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2005. - Т.69.№2. - С.199-206.

[A41] 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.

[A42] 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.

[A43] Андреев, С.С. Фазовращатели на основе свободновисящих многослойных структур Cr/Sc / С.С. Андреев, М.С. Бибишкин, Н. Kimura, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашченко, Т. Hirono, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Известия академии наук. Серия физическая. - 2005. - Т.69.№ 2. - С.207-210.

[A44] 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, Е.П. Чехонадских, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - №2. - С.23-27.

[A45] Andreev, S.S. Transmission type phase retarders based on free standing Cr/Sc multilayers / S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, T. Hirono, N. Kimura, E.B. Klunokov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2005. - V.543. - P.340-345.

[A46] Gaponov, S.V. Research activity in the field of projection EUV-Lithography within the framework of the Russian program / S.V. Gaponov, E.B. Klunokov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo // Abstracts of International Conference "Micro- and nanoelectronics - 2005", Zvenigorod, Russia, October 3-7, 2005. - O1-01.

[A47] Панкратов, Е.Л. Тепловые нагрузки рентгеновских трубок с неподвижным анодом при длительных выдержках / Е.Л. Панкратов, Н.И. Чхало // Теплофизика высоких температур. - 2006. - Т.44.№5. - С.570-576.



[A48] Барышева, М.М. Поляризационные и фазовращательные свойства многослойных рентгеновских зеркал с флуктуирующими параметрами. Численный анализ / М.М. Барышева, А.М. Сатанин, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2006. - №2. - С.96-100.

[A49] Вайнер, Ю.А. Исследование поперечной корреляции шероховатостей границ в многослойных структурах с ультракороткими периодами / Ю.А. Вайнер, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашенко, А.А. Фраерман, В.В. Чернов, Н.И. Чхало // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2006. - Т.130. №3. - С.401-408.

[A50] 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 симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 13-17 марта 2006. - Т.2. - С.387-388.

[A51] Вайнер, Ю.А. Многослойные рентгеновские зеркала на основе W/B<sub>4</sub>C с ультракороткими ( $d = 0.7 - 1.5$  нм) периодами / Ю.А. Вайнер, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, К.А. Прохоров, Н.Н. Салашенко, А.А. Фраерман, В.В. Чернов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - №1. - С.10-16.

[A52] Климов, А.Ю. Экспериментальные исследования возможностей интерферометра с дифракционной волной сравнения для контроля формы оптических элементов / А.Ю. Климов, Е.Б. Клюенков, А.Л. Мизинов, Е.Л. Панкратов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Е.Д. Чхало, Н.И. Чхало, Н.Б. Вознесенский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - №6. - С.99-103.

[A53] Забродин, И.Г. Абсолютно калиброванный измеритель ЭУФ-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. Салашенко, Л.А. Сулов, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало, Л.А. Шмаенок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - №6. - С.104-107.

[A54] Ахсахалян, А.А. Стенд для исследования фокусирующих свойств двоякоизогнутых рентгеновских зеркал / А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салашенко, А.И. Харитонов,

Н.И. Чхало, О.И. Бугаенко, С.В. Кузин, А.А. Перцов, С.В. Шестов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2007. - №7. - С.79-81.

[A55] Барышева, М.М. Изучение строения и отражательных характеристик в окрестности К-края поглощения бора  $\text{La}/\text{V}_4\text{C}(\text{V}_9\text{C})$  многослойных структур / М.М. Барышева, С.С. Андреев, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Гусев, С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Материалы совещания «Рентгеновская оптика - 2008», Черноголовка, Россия, 6-9 октября 2008. - С.32-34.

[A56] Пестов А.Е. Флуоресценция многослойных мишеней в окрестности 13,5 нм при возбуждении быстрыми электронами / А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Материалы симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2008. - Т.1. - С.220-221.

[A57] Забродин, И.Г. Рефлектометр для изучения оптики МР и ЭУФ диапазона / И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Материалы симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта 2008. - Т.1. - С.222-223.

[A58] Субботин, А.Н. Результаты тестирования рентгеновского спектрографа на базе многослойного зеркала с переменным по длине периодом / А.Н. Субботин, И.А. Гусихина, Н.В. Жидков, Н.И. Чхало, И.А. Щелоков // Digest reports of the XVII International Synchrotron Radiation Conference SR-2008, Novosibirsk, Russia, June 15 - 20, 2008. - P.1-9.

[A59] Chkhalo, Nikolay I. Capabilities of microinterferometer with digital recording of images for studying micro-objects with sub-nanometer resolution / Nikolay I. Chkhalo, Denis G. Raskin, and Nikolay N. Salashchenko // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702512.

[A60] Chkhalo, Nikolay I. A plane wave diffraction on a pin-hole in a film with a finite thickness and real electrodynamic properties / Nikolay I. Chkhalo, Illarion A. Dorofeev, Nikolay N. Salashchenko, and Mikhail N. Toropov // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702507.

[A61] Chkhalo, Nikolay I. A new source of a reference spherical wave for a point diffraction interferometer / Nikolay I. Chkhalo, Alexander Y. Klimov, Denis G. Raskin, Vladimir V. Rogov, Nikolay N. Salashchenko, and Mikhail N. Toropov // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702506.

- [A62] Chkhalo, Nikolay I. Manufacturing and investigation of objective lens for ultrahigh resolution lithography facilities / Nikolay I. Chkhalo, Evgeniy B. Kluev, Aleksey E. Pestov, Denis G. Raskin, Nikolay N. Salashchenko, and Mikhail N. Toropov // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702505.
- [A63] Bibishkin, M. S. Multilayer Zr/Si filters for EUV lithography and for radiation source metrology / M. S. Bibishkin, N. I. Chkhalo, S. A. Gusev, E. B. Kluev, A. Y. Lopatin, V. I. Luchin, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, N. N. Tsybin, and S. Y. Zuev // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702502.
- [A64] Chkhalo, N. Investigation of fluorescence on wavelength 13.5 nm of x-ray tube for nanolithographer / N. Chkhalo, I. Zabrodin, I. Kas'kov, E. Kluev, A. Pestov, and N. Salashchenko // Proc. SPIE, 2008. - V.7025. - P.702504.
- [A65] Chkhalo, N. Correction of the EUV mirror substrate shape by ion beam / N. Chkhalo, L. Paramonov, A. Pestov, D. Raskin, and N. Salashchenko // Proc. SPIE, 2008. - V.7025 - P.702503.
- [A66] Забродин, И.Г. Разборные рентгеновские трубки для исследований в диапазоне длин волн 0,6-20 нм / И.Г. Забродин, Е.Б. Ключенков, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Материалы совещания «Рентгеновская оптика - 2008», Черноголовка, Россия, 6-9 октября 2008. - С.44-46.
- [A67] Климов, А.Ю. Источник сферической волны на основе зонда ближнепольного микроскопа / А.Ю.Климов, В.В. Рогов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С.221-223.
- [A68] Ключенков, Е.Б. Коррекция формы оптических поверхностей с субнанометровой точностью. Проблемы, статус, перспективы / Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С.205-208.
- [A69] Пестов, А.Е. Моделирование интенсивности излучения рентгеновских трубок в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне / А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С.218-220.
- [A70] Салашченко, Н.Н. Коротковолновая проекционная литография / Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Вестник Российской Академии Наук. - 2008. - Т.78.№5. - С.13-20.

- [A71] Салашенко, Н.Н. Влияние неровностей субмикронных отверстий на дифракцию света / М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2008. - №7. - С.3-5.
- [A72] Chkhalo, N.I. A source of a reference spherical wave based on a single mode optical fiber with a narrowed exit aperture / N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, and M.N. Toropov // Rev. Sci. Instrum. - 2008. - V.79. - P.033107.
- [A73] М.С. Бибишкин, Е.Д. Казаков, Ю.С.Касьянов, В.И. Лучин, Н.Н. Салашенко, В.В. Чернов, Н.И. Чхало, А.П. Шевелько. Новые фокусирующие многослойные структуры для рентгеновской спектроскопии плазмы // Квантовая электроника 2008. №2. 169-171.
- [A74] Бороздин, Ю.Э. Рентгеновская и ВУФ спектроскопия плазмы с использованием новых фокусирующих многослойных структур / Ю.Э. Бороздин, Е.Д. Казаков, В.И. Лучин, Н.Н. Салашенко, И.Ю. Толстихина, В.В. Чернов, Н.И. Чхало, А.П. Шевелько, О.Ф. Якушев // Письма в ЖЭТФ. - 2008. - Т.87.Вып.1. - С.33-35.
- [A75] Водопьянов, А.В. Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда / А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфелд, А.Г. Николаев, К.П. Савкин, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало, Г.Ю. Юшков // Письма в ЖЭТФ. - 2008. - Т.88.Вып.2. - С.103-106.
- [A76] Клюенков, Е.Б. Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью / Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Раскин, М.Н. Торопов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Российские нанотехнологии. - 2008. - Т.3.№9-10. - С.90-98.
- [A77] Клюенков, Е.Б. Работы по созданию и аттестации рентгенооптических элементов и систем сверхвысокого разрешения в ИФМ РАН / Е.Б. Клюенков, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2009. - Т.73.№1. - С.66-70.
- [A78] Горай, Л.И. Определение углов наклона и высот граней квантовых точек из анализа диффузного и зеркального рентгеновского рассеяния / Л.И. Горай, Н.И. Чхало, Г.Э. Цырлин // Журнал технической физики. - 2009. - Т.79.№4. - С.117-124.

Чхало Николай Иванович

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРНЫХ И  
ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ  
РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ**

Автореферат

Подписано к печати 21 мая 2009 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Учреждения Российской академии наук  
Институт физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород,  
ГСП – 105.