

На правах рукописи

Барышева Мария Михайловна

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ  
РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния.

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
доцент  
Сатанин Аркадий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Бушуев Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Пунегов Василий Ильич

Ведущая организация: Институт кристаллографии Российской  
академии наук им. А.В. Шубникова

Защита состоится 1 ноября 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур Российской академии наук (603950, Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института физики микроструктур Российской академии наук

Автореферат разослан 1 октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

К. П. Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Многослойные структуры (МС) широко используются в качестве отражательных, поляризационных и фазовращательных элементов для различных задач рентгеновской оптики (РО), в частности, для диагностики плазмы, элементного флуоресцентного анализа, спектроскопии, фильтрации и диагностики свойств синхротронного излучения, в системах фокусировки и коллимации изображения. Широта применения МС обуславливается как возможностью изменения параметров МС в широком диапазоне, так и достигнутым к настоящему моменту совершенством технологии: методы магнетронного распыления позволяют изготавливать МС с толщиной слоев до 0,3-0,4 нм, состоящие из более чем 1500 отдельных пленок, наносить их на подложки различной геометрии [1-3].

Одним из наиболее актуальных направлений современной РО является создание оборудования для проекционной литографии с пространственным разрешением лучше 100 нм, то есть работающих в области экстремального ультрафиолетового диапазона (ЭУФ-литография). Специалисты ведущих российских и зарубежных научных центров сосредоточили свои усилия на изготовлении схем проекционной литографии на длине волны 13,5 нм, базирующихся на Mo/Si-структурах и имеющих высокие пиковые и интегральные коэффициенты отражения [4]. Одной из актуальных проблем здесь остается проблема повышения отражательной способности МС, поскольку, согласно оценкам, увеличение коэффициента каждого зеркала на 1% позволит вдвое уменьшить потери излучения в 11-зеркальной оптической схеме [5]. Регулировка фазы волновых полей МС позволяет добиться увеличения коэффициента отражения как в тринарных, так и в «стохастических» зеркалах.

Важнейшее применение многослойные рентгеновские зеркала находят в качестве поляризационных и фазовращательных элементов, предназначенных для работы в области так называемого «водного окна» - 2,3-4,5 нм, представляющего интерес, в частности, для исследования биологических объектов. Четвертьволновая пластинка, работающая в этом диапазоне, впервые была создана в ИФМ РАН на основе уникальной методики снятия МС с поддерживающей подложки [6,7]. Вместе с тем, серийное изготовление таких пластинок проде-

монстрировало значительный разброс поляризационных и фазовращательных характеристик в ансамбле МС, идентичных с точки зрения своих отражательных свойств. Для дальнейшего совершенствования технологии необходимо понять, с какими внутренними свойствами зеркал может быть связано подобное поведение МС. С другой стороны, по-прежнему стоит вопрос лабораторной аттестации поляризаторов по отражению, поскольку малость коэффициентов прохождения не позволяет проводить эксперименты на пропускание с рентгеновской трубкой в качестве источника.

Проблема аттестации, по сути, представляет собой обратную задачу: определение параметров МС по данным рефлектометрии. В рентгеновской оптике она тесно связана с фазовой проблемой: из-за высокой частоты рентгеновского излучения детектор фиксирует только интенсивность рассеянного сигнала, а информация о фазе волн теряется. Поиск новых подходов к решению этой проблемы по-прежнему актуален.

Следует отметить, что большое внимание ранее было уделено изучению оптических характеристик совершенных многослойных сред, также многочисленные усилия были предприняты для исследования влияния различных структурных несовершенств, таких как флуктуации и постоянные уходы периодов, взаимная диффузия материалов и отклонение плотностей пленок от табличных значений, на отражательные (амплитудные) характеристики МС. Между тем, необходим учет их влияния на фазовые характеристики (в том числе, на пропускание), что, в частности, позволит объяснить наблюдаемые свойства фазовращателей.

Ввиду вышесказанного, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений. Вопросы, рассмотренные в диссертации, являются частью научных исследований, проводившихся в ИФМ РАН по темам, поддержанным Российским фондом фундаментальных исследований. Кроме того, работы автора в данном направлении были поддержаны грантом в области естественных и гуманитарных наук «Лучшие аспиранты РАН», стипендией фонда Дмитрия Зимина «Династия», стипендией им. академика Разуваева.

## **Основные цели работы**

Цель диссертационной работы состоит в построении теории амплитудных и фазовых характеристик несовершенных МС, поиске но-

вых путей повышения отражательных способностей и извлечения дополнительной информации о параметрах многослойной структуры. В частности, необходимо решить следующие конкретные задачи:

- Исследовать влияние флуктуаций толщин слоев на отражательные характеристики МС при учете поглощения. Построить функции распределения коэффициента отражения.
- Проанализировать воздействие структурных дефектов (флуктуаций и постоянных уходов периодов) на фазовращательные свойства МС на просвет. Объяснить экспериментально наблюдаемое явление сильного различия поляризационных и фазовращательных свойств МС, идентичных с точки зрения отражения.
- Изучить смещение и искажение волновых пакетов, отраженных и прошедших МС; найти связь с параметрами среды. Проанализировать искажение изображения при отражении от планарных МС.
- Найти оптимальный периодический профиль в классе многослойных структур, исследовать целесообразность создания МС, образованных послойным напылением трех и более веществ.

## **Научная новизна**

1. Аналитически исследовано влияние флуктуаций на отражательные свойства МС в динамическом режиме с учетом поглощения. Получены приближенные выражения для функции распределения коэффициента отражения по интенсивности, его фазы.
2. Дано объяснение наблюдаемому эффекту сильного разброса поляризационных свойств в ансамбле четвертьволновых пластинок, идентичных с точки зрения отражения. Также фазовращательные свойства МС проанализированы на основе укороченных уравнений, что позволяет говорить об универсальности полученных выводов.
3. Исследован эффект искажения и латерального смещения рентгеновских пучков при отражении и распространении в МС.
4. Показано, что профилирование диэлектрической проницаемости по глубине с использованием более двух веществ может приводить к качественно новым эффектам. Использование периодических тринарных систем позволяет увеличить коэффициент отражения по сравнению с бинарными.

## **Научная и практическая значимость**

Научная значимость состоит в нахождении аналитического выражения для функции распределения коэффициента отражения поглощающей МС. Кроме того, найдена экспериментально измеряемая величина (латеральное смещение рентгеновских пучков), содержащая информацию о фазе коэффициентов отражения и прохождения, что может быть использовано при решении обратной задачи. Интересной представляется обнаруженная возможность различного профилирования действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости по глубине, недоступная для бинарных МС.

Практическая значимость состоит в объяснении причин сильного разброса фазовращательных характеристик в серии четвертьволновых пластинок, аттестованных по отражению как идентичные, изучении вопроса лабораторной аттестации элементов. Рентгеновские зеркала на основе тринарных систем, предложенные в работе, позволят в дальнейшем снизить потери мощности в многозеркальных литографических схемах, что тоже представляется практически важным.

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

1. Наличие поглощения в МС с флуктуирующими параметрами приводит к существованию стационарного решения для функции распределения коэффициентов отражения и их фаз. Из структуры решения видно, что в режиме брэгговского отражения флуктуации могут увеличивать коэффициент отражения по сравнению с идеально периодической структурой.
2. Флуктуации и детерминированные уходы периодов МС могут приводить к сильному различию поляризационных и фазовращательных свойств МС на просвет при близости отражательных характеристик. Причины этого эффекта состоят, во-первых, в разной длине формирования отраженного и прошедшего сигналов: отраженная волна формируется на длине экстинкции, в то время как в образовании прошедшей участвует вся толщина структуры. Вторая причина состоит в том, что рабочая точка фазовращателей принадлежит краю резонансной области, а именно эта область отстроек наиболее подвержена флуктуациям параметров, в то время как лабораторная аттестация проводится по отражению в центре дифракционного пика, где разброс значений наименьший.

3. При отражении (прохождении) от МС рентгеновские пучки претерпевают латеральное смещение и искажение формы. В случае спектрально-узких (по сравнению шириной дифракционного максимума) пучков это смещение определяется производной от фазы коэффициента отражения (прохождения) по поперечному волновому вектору. Величина смещения выражается через параметры МС и может быть привлечена для решения обратной задачи.

4. Профилирование МС по глубине за счет использования двух или большего числа веществ приводит к физически разным эффектам в диэлектрической проницаемости. В бинарных средах наилучшим с точки зрения отражения периодическим профилем является меандр. В тринарной системе при правильном подборе параметров может быть получено рентгеновское зеркало, промежуточное между бормановским и интерференционным, и обладающее большим коэффициентом отражения по сравнению с бинарными структурами.

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

Автором были выполнены все аналитические и численные расчеты, вошедшие в диссертацию. Постановка задач, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем А.М. Сатаниным. Работы [А2, А5, А9] выполнены при участии Н.И. Чхало и на основе экспериментальных результатов, полученным В.И. Лучиным и А.Я. Лопатыным. Работы [А10] возникли благодаря обсуждению эксперимента, поставленного В.Н. Полковниковым. Большая часть исследований инициирована Н.Н. Салашенко.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы были представлены на Всероссийских конференциях «Рентгенооптика» (2003 год) и «Нанофизика и наноэлектроника» (2005-2007 годы) в Нижнем Новгороде, заседании американского физического общества в Балтиморе (США, 2006), нижегородских сессиях молодых ученых (2003, 2005, 2006), вошли в сборник трудов первой международной научной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)» (Великий Новгород, 2007).

## Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, из которых 3 - статьи в отечественных реферируемых журналах и 8 - публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Первая глава представляет собой литературный обзор, остальные четыре – оригинальные. Объем диссертации составляет 140 страниц, приведен 41 рисунок и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 132 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется постановка задачи и научная новизна полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту. Указывается структура и объем диссертации, содержание работы по главам.

**Первая глава** представляет собой обзор достижений других научных групп в областях диссертационного исследования. Так, в первом параграфе упоминаются общие свойства веществ в рентгеновском диапазоне частот, обуславливающие необходимость создания элементов на основе М<sub>1</sub>

Третий параграф посвящен описанию поляризаторов и фазовращателей для рентгеновского диапазона, в частности, использующим свойства брэгговской дифракции – разную ширину пиков для  $s$ - и  $r$ -волн. Обосновывается необходимость изучения влияния несовершенств структуры на фазовращательные свойства МС, вытекающая из реальных проблем современной РО. Описывается метод лабораторной аттестации элементов [7], адекватность которого, впрочем, требует проверки.

В четвертом параграфе описывается эффект латерального сдвига пучка при отражении, носящий в оптике имя Гооса-Хенхен [10] и не изученный ранее в РО для МС. В случае спектрально-узких пучков указанное смещение определяется величиной  $\varphi$ , поэтому измерение эффекта может быть полезно для решения фазовой проблемы РО.

Пятый параграф посвящен проблеме повышения отражательной способности МС, что особенно важно при создании многозеркальных схем. Особое внимание уделяется работам, в которых предлагается оптимизация профиля диэлектрической проницаемости МС по глубине  $\varepsilon(z)$  за счет перехода к апериодическим зеркалам [11] или введения антидиффузионных прослоек [12].

В шестом параграфе излагаются стандартные методы расчета оптических свойств МС. Это, в первую очередь, метод медленных амплитуд, являющийся основой всех аналитических выкладок и качественных оценок, и метод рекуррентных соотношений, применяемый для точных численных расчетов [12].

В последующих главах представлены оригинальные результаты.

**Вторая глава** посвящена изучению влияния флуктуаций параметров на отражательные свойства МС при учете поглощения. На основе аппарата уравнений Фоккера – Планка найдены стационарные распределения коэффициентов отражения  $W(R)$  и их фаз как в нерезонансном случае, так и в режиме брэгговского отражения.

В случае, когда параметры системы далеки от резонансных, новизна состоит в учете флуктуаций  $\text{Im } \varepsilon$ , что приводит к появлению в диффузионном уравнении для  $W(R)$  новой характерной длины.

В резонансном случае учет несовершенств произведен в модели малых флуктуаций основных параметров резонансной кривой. Показано, что в поглощающей системе существует стационарное решение  $W(R)$ , содержащее аномальные реализации, для которых коэффициент отражения  $R$  выше, чем в строго периодических МС. Этот

вывод подтверждают результаты численного моделирования (рис. 1). Кроме того, можно видеть, что наиболее подверженной флуктуациям оказывается область на краю резонанса, поскольку здесь малые флуктуации приводят к переключению между качественно разными режимами – резонансным и нерезонансным.

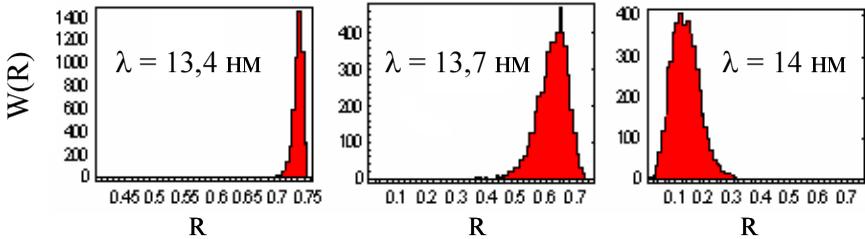


Рис 1. Функции распределения коэффициента отражения для  $Mo/Si$  с параметрами  $d = 6,97 \text{ nm}$ ,  $\beta = 0,44$ ,  $N = 40$ ,  $\theta = 5^\circ$ , толщины слоев флуктуируют по гауссовому закону с дисперсией  $\delta h = 0,5 \text{ nm}$ .

Также найдено и объяснено на основе простой модели распределение для фазы коэффициента отражения, которая, в отличие от нерезонансного режима, является медленной функцией.

**В третьей главе** на основе общего анализа свойств МС сформулированы условия, при которых возможно достижение лучших фазовращательных свойств. Показано, что за счет поглощения при пропускании достигаются большие сдвиги по сравнению с отражением, причем точка наибольшей разности фаз находится в той же области отстроек, где имеется единственная точка, в которой  $T_s = T_p$ .

С помощью теории возмущений исследовано влияние флуктуаций периодов на отражательные и пропускательные характеристики непоглощающих МС (рис.2). Показано, что с ростом  $L$  дисперсии  $R$ ,  $\varphi$  выходят на насыщающийся режим, в то время как дисперсии  $T$ ,  $\psi$  линейно растут, что объясняется разной длиной формирования отраженного и прошедшего сигналов:  $R$ ,  $\varphi$  формируются на глубине экстинкции  $L_{ex}$ ;  $T$ ,  $\psi$  – всей толщиной структуры.

Это рассуждение, подтвержденное численным анализом для реалистичных МС, показывает, что эффект сильного различия поляризационных свойств зеркал, идентичных с точки зрения отражения, может быть объяснен влиянием флуктуаций и детерминированных уxo-

дов периодов. Так, для Cr/Sc четвертьволновой пластинки ( $d_0 = 3,14 \text{ нм}$ ,  $\beta = 0,47$ ,  $N = 300$ ,  $\sigma = 0,4 \text{ нм}$ ,  $\lambda = 3,12 \text{ нм}$ ) при флуктуациях периодов  $\delta d \sim 1\%$ , наиболее вероятное значение  $R_{max}$  уменьшается всего на  $0,5\%$ , относительная ширина функции распределения  $\sim 1\%$ . При этом максимальный фазовый сдвиг  $\psi_s - \psi_p$  уменьшается на  $\sim 5^\circ$ , разброс значений составляет уже  $\sim 7\%$ , а для отношения  $T_s/T_p$  в точке  $\psi_s - \psi_p = \pi/2 - 18\%$ .

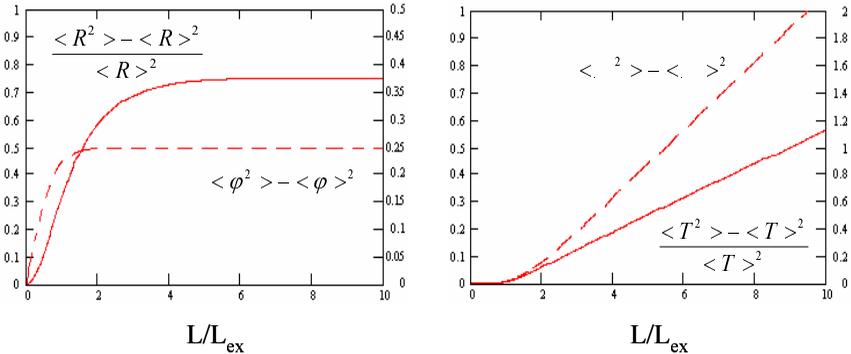


Рис. 2. Зависимости дисперсий коэффициентов отражения и прохождения (сплошная линия) и их фаз (пунктирная линия) от толщины МС (отн. ед.)

Малые детерминированные изменения периода оказывают воздействие, сравнимое с флуктуациями. Однако оказывается, что, в отличие от флуктуаций, детерминированные уходы могут быть определены по измерениям высших дифракционных пиков на длине волны  $\lambda = 0,154 \text{ нм}$  согласно [7], а их влияние на поляризационные свойства точно предсказано.

**В четвертой главе** исследуется распространение волновых пакетов в МС. Спектрально-узкие (по сравнению с шириной резонанса) пучки при отражении и прохождении смещаются вдоль поверхности

МС на величины  $\delta_r = -\frac{d\varphi}{dp}$  и  $\delta_t = -\frac{d\psi}{dp}$ ,  $p = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$  (рис. 3).

При  $L \gg L_{ex}$  это эквивалентно отражению от поверхности, расположенной на глубине экстинкции, при  $L \ll L_{ex}$  - от дальней границы МС. Спектрально-широкие пучки кроме смещения претерпевают искажения, здесь зависимость величины сдвига от параметров МС продемонстрирована численно на примере Cr/Sc МС, описанной в преды-

дущем разделе. Во всех случаях р-поляризованные пучки смещаются сильнее s-поляризованных.

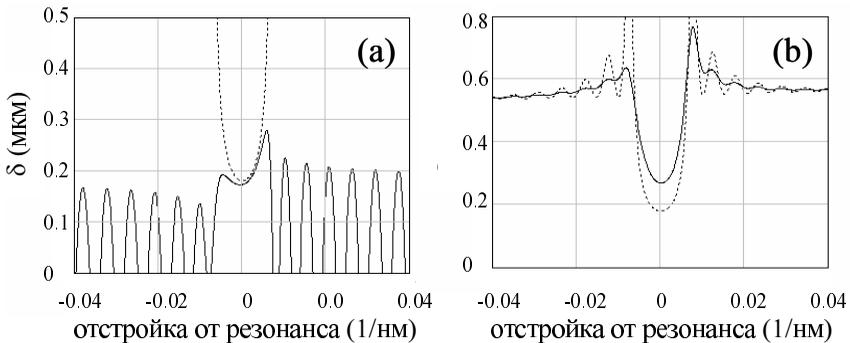


Рис. 3. Величина сдвига s-поляризованного пучка при отражении (а) и пропускании (б) в зависимости от отстройки в случаях с поглощением (сплошная линия) и без него (пунктир).

В рентгеновском диапазоне, в отличие от оптического, латеральное смещение возрастает при уменьшении  $\lambda$ , достигая нескольких микрон в области  $\lambda \sim 0,1$  нм. Связь величин сдвига с параметрами МС и реалистичные значения позволяют рассматривать возможность использования эффекта для решения обратной задачи.

Поскольку в реальных литографических схемах углы падения излучения  $\theta > 0$  (обычно несколько градусов), описанные эффекты должны приводить к искажению изображения при распространении в оптической схеме, что было проанализировано на примере отражения синусоидального и меандрового волнового профиля от МС.

В данной главе также исследовано поведение волнового поля внутри среды.

**В пятой главе** решалась задача оптимизации профиля диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(z)$  МС по глубине в классе периодических систем, образованных напылением двух или большего числа веществ. Показано, что для бинарных МС наиболее выгодным является хорошо изученный ранее меандровый профиль, дающий наибольшую амплитуду гармоник  $\varepsilon(z)$  при фиксированном среднем значении  $\text{Im } \varepsilon(z)$ .

При профилировании за счет использования большего числа материалов проявляется новый эффект: между  $\text{Re } \varepsilon(z)$  и  $\text{Im } \varepsilon(z)$  возни-

кает фазовый сдвиг  $\Phi$ , позволяющий увеличить коэффициент отражения: наибольшим он оказывается при  $\Phi = \pi/2$ , когда максимумы отражения находятся в нулях поглощения.

Рассмотрены периодические структуры, образованные послойным напылением трех веществ - тринарные МС. Показано, что для многих из них введение третьего вещества позволяет увеличить коэффициент отражения, в то время как замена им одного из веществ бинарной МС приводит к ухудшению отражательных свойств. Например, добавление Ru в Mo/Si (рис. 4) дает большой скачок  $\varepsilon(z)$  по сравнению с Mo, хотя и обладает бóльшим поглощением. Однако, за счет смещения узла волнового поля в сильнопоглощающую область (эффект Бормана) влияние поглощения частично нейтрализуется и  $R$  увеличивается. Отметим, что эффект зависит от знака  $\Phi$ , а следовательно, от порядка напыления веществ.

В абсолютных значениях выигрыш обычно невелик и составляет единицы процентов, однако, может быть существенен при использовании в многозеркальных схемах.

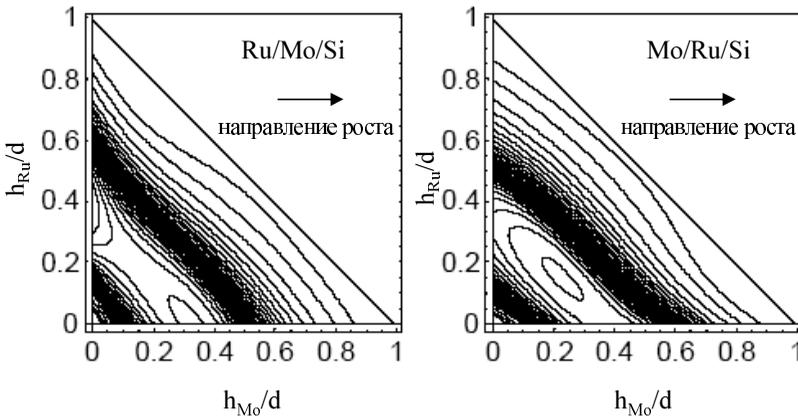


Рис. 4. Зависимость пикового коэффициента отражения МС, содержащей Si, Mo и Ru от долей веществ в периоде;  $d = 6,9 \text{ нм}$ ,  $N = 100$ ,  $\lambda = 13,5 \text{ нм}$ .

Кроме чисто оптического влияния, рассмотрен случай использования третьего вещества в качестве антидиффузионной прослойки. На примере простой математической модели продемонстрировано наличие максимума в зависимости  $R$  от толщины барьера. Представляется перспективным использование сочетания этих эффектов.

**В Заключении** сформулированы основанные выводы по результатам работы.

## **Основные результаты работы**

**1.** Исследовано влияние флуктуаций параметров на отражательные свойства МС в динамическом приближении с учетом поглощения. На основе аппарата уравнения Фоккера – Планка найдены стационарные функции распределения амплитуд и фаз коэффициентов отражения при учете поглощения в системе. Показано, что флуктуации могут приводить к усилению отражения по сравнению с регулярными структурами.

**2.** Фазовращательные свойства МС проанализированы как численно, так и на основе укороченных уравнений, что позволяет учесть влияние многократного отражения. Показано, что наблюдаемый эффект сильного разброса поляризационных свойств в ансамбле фазовращателей, идентичных с точки зрения отражения, может вызываться флуктуациями и систематическими уходами толщин слоев. Согласно проведенному анализу, одной из причин этого является разная длина формирования отраженного и прошедшего сигналов: отраженная волна формируется на длине экстинкции, в то время как в образовании прошедшей участвует вся толщина структуры. Вторая причина состоит в том, что рабочая точка фазовращателей принадлежит краю резонансной области. Именно эта область отстроек наиболее подвержена флуктуациям параметров, в то время как аттестация по отражению проводится по данным в центре дифракционного пика, где разброс значений коэффициентов отражения при учете флуктуаций наименьший.

**3.** Показано, что для параметров многослойных структур, изготавливаемых в ИФМ РАН, детерминированное изменение периода может быть достоверно измерено по уширению дифракционных пиков на длине волны  $\lambda = 0,154$  нм согласно методике, предложенной в работе [3] и, соответственно, его влияние на поляризационные свойства МС может быть точно учтено.

**4.** Исследован эффект искажения и латерального смещения рентгеновских пучков при отражении и распространении в многослойных структурах. При этом в рентгеновском диапазоне (в отличие от оптического) величина смещения возрастает по мере продвижения в об-

ласть меньших длин волн и достигает единиц микрон в области  $\lambda \sim 0,1$  нм.

**5.** Изучена зависимость величины смещения от параметров МС и свойств пучка. В частности, для спектрально-узких (по сравнению с шириной резонансной области) пучков смещение определяется производной от фазы коэффициента отражения (прохождения) по поперечному волновому вектору. Наличие дополнительной информации о МС, содержащейся в фазовой функции, позволит продвинуться в решении обратной задачи РО.

**8.** Имея в виду проблему искажения изображений при распространении в многозеркальных литографических схемах, исследовано отражение волнового пакета с синусоидальным профилем интенсивности при наклонном падении на планарную МС. Продемонстрировано, что в этом случае наряду с искажением и уменьшением резкости появляется также смещение профиля.

**9.** Проблема увеличения пикового коэффициента отражения МС требует решения задачи оптимизации профиля диэлектрической проницаемости по глубине структуры, которое может быть произведено за счет использования любого количества различных материалов. При этом оказывается, что применение более двух веществ приводит к качественно новому эффекту - различному профилированию действительной  $\text{Re } \varepsilon(z)$  и мнимой  $\text{Im } \varepsilon(z)$  частей диэлектрической проницаемости.

**10.** Для периодических бинарных структур наиболее оптимальным с точки зрения максимизации коэффициента отражения является меандровый профиль диэлектрической проницаемости.

**11.** Показано, что тринарные МС могут давать выигрыш в коэффициенте отражения по сравнению с бинарными МС при введении в структуру сильно поглощающего вещества при том, что замещение им одного из материалов МС приводит только к ухудшению свойств МС. Проанализированы причины этого явления как оптические, связанные с эффектом Бормана, так и структурно-химические – антидиффузионное влияние дополнительного слоя.

## **Список цитированной литературы**

[1] Салашенко, Н.Н. Исследования в области многослойной рентгеновской оптики в Институте физики микроструктур // Поверхность. Рент., синхр. и нейтр. исслед. – 1999 - №1. - С. 50-60.

- [2] Виноградов, А.В. Многослойная рентгеновская оптика // Квант. Эл. – 2002 - т.32 - №12. - с. 1113-1121.
- [3] Akhsakhalyan, A.D. / Method for manufacturing of double-bent X-ray optics / A.D. Akhsakhalyan, N.I. Chkhalo, A.I. Kharitonov // Nucl.Ins. and Meth.in Phys.Res.A – 2001 – V. 470 - P. 142-144.
- [4] Stulen, R.H. Extreme ultraviolet lithography / R.H. Stulen, D.W. Sweeney // IEEE J. Quant. Electron. – 1999 – V. 35 - P. 694-699.
- [5] Yulin, S.A. Enhanced reflectivity and stability of EUV mirrors // Рентгеновская оптика: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2–6 мая 2004. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. – С. 3.
- [6] Andreev, S.S. Application of free-standing multilayer film as polarizers for X-ray radiation / S.S. Andreev, M.S. Bibishkin, N.N. Chkhalo et al // Nucl.Ins. and Meth.in Phys.Res.A. – 2005 – V. 543 - P. 340-345.
- [7] Андреев, С.С. Фазовращатели на основе свободновисящих многослойных структур // С.С. Андреев, М.С. Бибишкин, Х. Кимура и др. // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005 – Т.69 - № 2 - С. 207-210.
- [8] Anderson, P.W. New method for scaling theory of localization / P.W. Anderson, D.J. Thouless, E. Abrahams, D.S. Fisher // Phys.Rev. B – 1980 - V. 22 - №8 - p.3519-3526.
- [9] Shellan, J.B. Statistical analysis of Bragg reflectors / J.B. Shellan, P. Agmon, A. Yariv // J. Opt. Soc. Am. - 1978. - V. 68 -№1 - P.18-27.
- [10] Андреев, А.В. Смещение отраженных пучков рентгеновского излучения / А.В. Андреев, В.Е. Горшков, Ю.А. Ильинский // ЖТФ – 1987 - Т. 57 - № 3 -С. 511-522.
- [11] Буренков, Д.С. Алгоритм для вычисления оптимальных параметров многослойных аперидических зеркал, предназначенных для мягкого рентгеновского диапазона / Д.С. Буренков, Ю.А.Успенский, И.А. Артюков, А.В. Виноградов // Квант. электроника – 2005 – т. 35 - № 2 - С. 195-199.
- [12] Зуев, С.Ю. Влияние антидиффузионных слоев  $\text{V}_4\text{C}$  и  $\text{Cr}$  на отражательные характеристики многослойных рентгеновских зеркал на основе  $\text{Mo/Si}$  / С.Ю. Зуев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко // Нанозифика и наноэлектроника: Материалы X симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17 марта 2005. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – Т. 2. – С. 391.
- [13] Зеркальная рентгеновская оптика, под общ. Ред. А.В.Виноградова // Л., Машиностроение – 1989 –с. 75-114.

## Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] Сатанин, А.М. Брэгговские резонансы в многослойных структурах со случайными параметрами / А.М. Сатанин, М.М. Барышева // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005.- №5. - С.19-24.
- [A2] 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. 96-101.
- [A3] Барышева, М.М. Фазовые характеристики рентгеновских зеркал / М.М. Барышева, А.М. Сатанин // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – Т. 71. – № 1. - С. 73-76.
- [A4] Сатанин, А.М. Брэгговские резонансы в многослойных структурах со случайными параметрами / А.М. Сатанин, М.М. Токман (Барышева) // Рентгеновская оптика: материалы всероссийского совещания – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. – Т. 2. – С. 344-349.
- [A5] Барышева, М.М. Поляризационные свойства многослойных рентгеновских зеркал с флуктуирующими параметрами. Численный анализ. / М.М.Барышева, А.М. Сатанин, Н.И. Чхало // Нанوفизика и нанoeлектроника: материалы IX всероссийского симпозиума – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2005. – Т. 2. – С. 487-488.
- [A6] Барышева, М.М. Латеральное смещение рентгеновских пучков и фазовая проблема рефлектометрии многослойных периодических структур / М.М. Барышева, А.М. Сатанин // Нанوفизика и нанoeлектроника: материалы X всероссийского симпозиума – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – Т. 2. – С. 364-365.
- [A7] Барышева, М.М. Фазовращатели на основе многослойных рентгеновских зеркал: влияние дефектов / М.М. Барышева, А.М. Сатанин // Нанوفизика и нанoeлектроника: материалы X всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, Россия, 13–17марта 2006. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – Т. 2. – С. 366-367.
- [A8] Барышева, М.М. Флуктуации амплитудных и фазовых характеристик многослойных структур / М.М. Барышева, А.М. Сатанин // Нанوفизика и нанoeлектроника: материалы X всероссийского симпозиума. – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. – Т. 2. – С. 396-397.
- [A9] Satanin, A. Polarizing and phase-shifting properties of multilayered X-ray mirrors with fluctuating parameters / Arkady Satanin, Maria Bary-

sheva, Nikolay Chkhalo // 2006 APS March Meeting. Baltimore, MD - <http://meeting.aps.org/Meeting/MAR06/Event/41648>

[A10] Барышева, М.М. Оптимизация отражательных характеристик трехкомпонентных зеркал / М.М. Барышева, А.М. Сатанин, В.Н. Полковников // Нанofизика и наноэлектроника: материалы XI всероссийского симпозиума – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – Т. 2. – С. 331-332.

[A11] Барышева, М.М. Стохастические зеркала / М.М. Барышева, А.М. Сатанин // Нанofизика и наноэлектроника: материалы XI всероссийского симпозиума – Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2007. – Т. 2. – С. 363.

Барышева Мария Михайловна

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ  
РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВОЛНОВОГО ПОЛЯ**

Автореферат

Подписано к печати 13 сентября 2007 г.

Тираж 100 экз.

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