

На правах рукописи

Полковников Владимир Николаевич

**МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ
АСТРОНОМИИ И ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

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

Нижний Новгород - 2013

Работа выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН).

Научный руководитель: член – корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Салащенко Николай Николаевич
ИФМРАН, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор
Голубев Сергей Владимирович
ИПФРАН, г. Нижний Новгород

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится **5 декабря** 2013г. в **14:00** часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института физики микроструктур РАН по адресу: 607680, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан **5 ноября** 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



К.П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Значительный прогресс последних десятилетий в создании эффективно отражающих многослойных зеркал (МЗ) нормального падения для диапазона длин волн 1-30 нм обеспечил продвижение в таких областях исследований как рентгеновская астрономия и рентгеновская проекционная литография.

МЗ характеризуется, прежде всего, коэффициентом отражения R . В широком смысле: его зависимостью от длины волны или угла падения излучения в довольно широких пределах. Или более узко: пиковым коэффициентом отражения на рабочей длине волны λ при заданном угле падения и шириной кривой отражения на половине ее высоты $\Delta\lambda$. Как правило, этот последний параметр определяется в виде $\lambda/\Delta\lambda$ и носит название спектральной селективности. Кроме того, развитие прецизионной изображающей оптики в настоящее время предъявляет высокие требования к форме поверхности зеркал. В частности, для решения задач проекционной нанолитографии и рентгеновской микроскопии отклонение формы от заданной не должно превышать десятых долей нанометра [1]. Однако возникающие в ходе роста структур внутренние напряжения приводят к деформациям МЗ на подложках на величины до десятков нанометров.

Серьезный прорыв рентгеновской астрономии, а именно в изучении солнечной короны, непосредственно связан с применением МЗ. И если угловое разрешение телескопов неуклонно росло с конца 1980-х гг и до начала XXI века, то спектральное и временное разрешения, связанные с отражательными характеристиками МЗ, входящими в состав оптических схем, оставались практически неизменными. Применявшиеся в XX веке зеркала на основе Mo/Si достигали на длинах волн 17,5 и 30,4 нм 44% и 23% соответственно при величинах спектральной селективности $\lambda/\Delta\lambda$ 20 и 9 единиц [2]. В настоящее время для построения изображений солнечной короны в наиболее узких спектральных полосах такие отражательные характеристики следует признать недостаточными. Возникает задача создания МЗ с величинами спектральной селективности, в разы превосходящими прежние аналоги, и с коэффициентами отражения, превосходящими указанные.

Одним из актуальных направлений современной рентгеновской оптики является проблема создания оборудования для проекционной литографии с пространственным разрешением лучше 40 нм. Успехи последнего времени связаны с технологией, основанной на применении ArF эксимерного лазера с рабочей длиной волны 193 нм [3]. Однако данная технология достигла своего предела, и дальнейший прогресс на ее основе становится невозможным. Наиболее перспективный путь развития связан с пе-

реходом к меньшим длинам волн, с уходом в область экстремального ультрафиолетового или мягкого рентгеновского диапазонов длин волн.

В диапазоне длин волн, больших 10 нм, интерес представляет окрестность 13,5 нм [4], для которой, во-первых, возможно создание эффективных источников излучения, во-вторых, именно для этой окрестности существуют зеркала на основе Mo/Si, обладающие рекордными коэффициентами отражения, достигающими почти 70% [5,6]. С точки зрения создания МЗ для проекционной литографии на длине волны 13,5 нм можно выделить две проблемы. Первое – максимизация пикового коэффициента отражения на рабочей длине волны. Второй проблемой является создание оптических элементов с формами поверхностей, соответствующими расчетным значениям с субнанометровой точностью.

Дальнейшая миниатюризация размеров элементов на чипе требует еще большего снижения рабочей длины волны и уводит разработчиков литографического оборудования в область мягкого рентгеновского излучения $\lambda < 10$ нм. В этом диапазоне наиболее перспективными представляются спектральные области вблизи краев поглощения иттрия Y $\lambda = 9,34$ нм и бора B $\lambda = 6,63$ нм. Теоретический расчет предсказывает для зеркал, оптимизированных на 9,34 нм коэффициенты отражения, превышающие 60%, а для зеркал на 6,67 нм – достигающие 80%. Однако практического достижения подобных значений к настоящему времени не произошло.

Таким образом, в любом приложении важнейшими характеристиками МЗ являются его отражательные характеристики (коэффициент отражения, спектральная селективность). Кроме того, в ряде задач следует учитывать механические напряжения в многослойной структуре. Важно отметить, что вне зависимости от конкретного применения МЗ на его оптические и механические свойства влияют одни и те же параметры, являющиеся, в конечном счете, следствием условий роста и химического состава покрытия. Поэтому при разработке, синтезе и изучении свойств МЗ, предназначенных для работы в различных диапазонах длин волн, применимы общие подходы.

Степень разработанности темы исследования. Задача создания узкополосных МЗ для рентгеновской астрономии возникла лишь в последние годы. До проекта ТЕСИС (запуск в 2009 г) основой для отражающих покрытий служили зеркала Mo/Si. Некоторые попытки заменить их более эффективно отражающими зеркалами предпринимались, например, в [7,8]. Однако полученные тогда результаты не удовлетворяют требованиям эксперимента ТЕСИС. Для повышения коэффициента отражения Mo/Si зеркал широко применяются барьерные слои на основе углерода. Однако в России такие работы не ведутся. Наконец, совершенно не реше-

на проблема создания МЗ для проекционной литографии с рабочей длиной волны меньше 10 нм [9,10].

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка, синтез и изучение свойств многослойных зеркал для рентгеновской астрономии и проекционной рентгеновской и ЭУФ литографии.

Основные задачи работы, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, определяются следующим образом:

1. Разработка и синтез многослойных зеркал для астрофизического эксперимента ТЕСИС. Обеспечение отражательных характеристик МЗ, удовлетворяющих требованиям временного и спектрального разрешения эксперимента. Асферизация ряда зеркал для обеспечения требуемого пространственного разрешения телескопов. Изготовление комплектов зеркал для оптических схем телескопов обсерватории ТЕСИС.

2. Изучение оптических и механических свойств многослойных зеркал Mo/Si, предназначенных для создания оптических элементов схем проекционной литографии с рабочей длиной 13,5 нм. Минимизация ширины переходных областей на границах раздела материалов с целью увеличения пикового коэффициента отражения зеркал. Компенсация упругих деформаций зеркал, вызываемых внутренними напряжениями в покрытиях Mo/Si.

3. Разработка, синтез и изучение свойств зеркал нормального падения, оптимизированных на $\lambda=9,3$ нм и $\lambda=6,7$ нм. Определение возможности создания высокоотражающих многослойных покрытий для оптических схем проекционной литографии с рабочей длиной волны меньше 10 нм.

Научная новизна работы определяется оригинальностью полученных результатов и заключается в следующем:

1. Впервые предложены и синтезированы многослойные зеркала на основе Al/Zr и Al/Si, предназначенные для работы в диапазоне длин волн больших 17,1 нм. Первые обладают рекордным коэффициентом отражения, вторые – рекордной спектральной селективностью в этой области длин волн.

2. Впервые предложен и изучен ряд магнийсодержащих зеркал: Mg/Cr, Mg/Si и Mg/Si с антидиффузионными слоями на основе карбида бора и хрома. Основными проблемами, препятствующими получению высоких и стабильных во времени коэффициентов отражения, являются значительная величина межслоевой шероховатости и окисление слоев магния. Показано, что четырехкомпонентная структура Si/B₄C/Mg/Cr обладает относительно стабильными во времени отражательными характеристиками и одновременно рекордной величиной спектральной селективности в диапазоне длин волн в окрестности 30,4 нм.

3. Изучены внутренние напряжения многослойных структур Mo/Si и Cr/Sc. Предложена методика компенсации упругих деформаций зеркал на основе Mo/Si с помощью антистрессового покрытия на основе Cr/Sc. В тестовом эксперименте продемонстрирована остаточная деформация на уровне единиц процента от исходной.

4. Для синтезированных многослойных зеркал Ru/Y получено рекордное значение пикового коэффициента отражения на длине волны 9,34 нм.

5. Изучены свойства многослойных зеркал на основе La/B₄C, предназначенных для создания оптических элементов схем проекционной литографии следующего поколения с рабочей длиной волны около $\lambda=6,7$ нм. Показано, что основной причиной низкого коэффициента отражения являются уширенные переходные области между материалами структуры. Предложен ряд антидиффузионных слоев на основе Sn, Mo, C. Показано, что осаждение тонких слоев углерода обеспечивает снижение ширины переходных областей в зеркалах La/B₄C. Это позволило достичь рекордного коэффициента отражения $R=58,3\%$ на длине волны $\lambda=6,663$ нм.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. На основе многослойных структур Mo/Si, Al/Zr и Si/B₄C/Mg/Cr изготовлены комплекты многослойных зеркал как с асферизирующим покрытием, так и без него для оптических схем телескопов обсерватории ТЕСИС. В ходе эксперимента ТЕСИС получены изображения солнечной короны в нескольких спектральных линиях с рекордным угловым (1,7") и хорошим временным разрешением (1 с).

2. Изучено влияние антидиффузионных слоев карбида бора на оптические свойства многослойных зеркал Mo/Si, оптимизированных на длину волны $\lambda=13,5$ нм. Продемонстрирована возможность увеличения коэффициента отражения на 1,7 абсолютных процента.

3. Получение относительно высоких коэффициентов отражения в окрестности $\lambda=6,7$ нм обеспечивает принципиальную возможность перехода к технологии проекционной литографии с соответствующей рабочей длиной волны.

Методология и методы исследований. Особенности изготовления и изучения МЗ связаны с малыми величинами периодов и толщин отдельных слоёв и с большим числом периодов. При этом разброс толщин периодов не должен превышать 0,01 нм, а среднеквадратичная величина шероховатостей должна оставаться на уровне 0,1-0,3 нм.

В рамках работы широко применялись следующие методики:

- Расчет отражательных характеристик МЗ и отбор материалов осуществлялись в соответствии с методами рекуррентных соотношений и медленных амплитуд.

- Синтез структур осуществлялся методом магнетронного напыления на установке, разработанной и собранной при участии автора.

- Параметры структур (период, индивидуальные толщины слоев, плотность элементов, межслоевая шероховатость) определялись методом малоугловой рентгеновской дифракции на дифрактометре Philips XPert Pro ($\lambda=0,154$ нм).

- Отражательные характеристики МЗ в мягкой рентгеновской и ЭУФ областях спектра измерялись на рефлектометре, построенном на базе двух монохроматоров РСМ-500 и ЛНТ-30.

Положения, выносимые на защиту:

1. Созданы многослойные зеркала Al/Zr и Al/Si, обладающие рекордными коэффициентами отражения и величинами спектральной селективности в области длин волн, больших 17,1 нм.

2. Получена четырехкомпонентная структура Si/B₄C/Mg/Cr, обладающая наиболее стабильными во времени отражательными характеристиками и рекордной величиной спектральной селективности в окрестности длины волны 30,4 нм.

3. Введение барьерных слоев карбида бора позволит увеличить коэффициент отражения на многослойных зеркалах Mo/Si, оптимизированных на $\lambda=13,5$ нм, на 2,5 процента.

4. Осаждение на подложку антистрессовой структуры Cr/Sc позволяет компенсировать упругие деформации зеркал Mo/Si.

5. Применение антидиффузионных слоев углерода и карбида бора позволит достичь рекордных коэффициентов отражения зеркал Mo/Y и Ru/Y в окрестности $\lambda=9,5$ нм.

6. Применение антидиффузионных слоев углерода позволит достичь рекордных коэффициентов отражения для многослойных зеркал нормального падения La/B₄C.

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

Вопросы, связанные с внутренними напряжениями в многослойных структурах Cr/Sc и Mo/Si, а также компенсация упругих деформаций обсуждались в рамках рабочего совещания «Рентгеновская оптика-2003», г. Нижний Новгород, 2003 г и на IV Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ-2003), г. Москва, 2003 г.

О влиянии антидиффузионных слоев B₄C на отражательные характеристики Mo/Si-зеркал сделан доклад на X и XI симпозиумах «Нанопизика

и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2006 и 2007 гг.

Результаты работ по разработке, синтезу и исследованию свойств многослойных зеркал, предназначенных для построения оптических схем телескопов обсерватории ТЕСИС, докладывались на рабочем совещании «Рентгеновская оптика-2004», г. Нижний Новгород, 2004 г., на рабочих совещаниях «Рентгеновская оптика», г. Черноголовка 2008 и 2010 гг., а также на XII, XIII, XIV, XV и XVII симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2008, 2009, 2010, 2011 и 2013 гг., на Всероссийской конференции «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов», г. Белгород, 2009 г.

Результатам исследования в области создания высокоотражающих многослойных зеркал для проекционной литографии с рабочей длиной волны меньше 10 нм были посвящены доклады на рабочих совещаниях «Рентгеновская оптика», г. Черноголовка, 2008 и 2012 гг., на XIII, XVI и XVII симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2009, 2012 и 2013 гг.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка задачи исследования, излагаются проблемы, с которыми сталкивается рентгеновская оптика при создании многослойных зеркал для таких приложений, как рентгеновская и ЭУФ астрофизика и проекционная литография. Формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации.

В первой главе формулируются базовые принципы отбора материалов для создания МЗ. Выбор материалов следует проводить по такой схеме. Прежде всего выбирается слабопоглощающий или базовый элемент зеркала (индекс 2). Для сильнопоглощающего или контрастного материала (индекс 1) требуется сочетание относительно невысокого поглощения с высоким оптическим контрастом по отношению к слабопоглощающему материалу. В качестве ориентира для выбора сильнопоглощающего элемента можно воспользоваться максимизацией соотношения $|\text{Re}(\epsilon_1 - \epsilon_2)|/\text{Im}\epsilon_1$.

Ниже обсуждаются основные причины ухудшения отражательных характеристик синтезированных МЗ. Среди них выделяются три: межслоевая шероховатость, отличие реальных плотностей материалов в структуре от табличных значений и нарушение периодичности в МЗ. Важно отметить, что термин «шероховатость» (обозначение: σ) является общим, суммирующим несколько различных физических явлений. Во-первых, это собственно шероховатость, то есть поверхностные микронеровности пленки. Во-вторых, это переходной слой между пленками двух материа-

лов. Переходной слой характеризуется неким распределением диэлектрической проницаемости, изменяющейся в его пределах от ϵ_1 до ϵ_2 и обратно. Его ширина входит как составная часть в суммарную величину σ .

Далее рассматривается влияние внутренних напряжений в многослойных структурах на изменение формы поверхностей подложек, и описывается общий подход к измерению их значений. Самые наглядные методы измерения напряжений основаны на следующем свойстве. Если пленка в напряженном состоянии осаждена на поверхность подложки, подложка будет изгибаться. Этот изгиб может быть измерен, а соответствующее напряжение вычислено по результатам измерения кривизны системы с привлечением формулы Стони [39,40]:

$$s = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{подл}^2}{d_{пл}} \left(\frac{1}{R_{после}} - \frac{1}{R_{до}} \right) \quad (1)$$

где E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки, $d_{подл}$ и $d_{пл}$ – толщины подложки и пленки, $R_{до}$ и $R_{после}$ – радиусы кривизны подложки до и после осаждения на нее пленки.

Ниже следует обзор МЗ, синтезированных различными группами и лабораториями для рентгеновской астрономии. Основное внимание уделено МЗ, предназначенным для работы в окрестности длин волн 17,1 нм и 30,4 нм (каналы регистрации обсерватории ТЕСИС). Здесь в равной степени важнейшими характеристиками отражающих покрытий являются пиковый коэффициент отражения и спектральная селективность.

Основной вклад в спектральное разрешение приборов вносит зависимость коэффициента отражения входящих в состав оптической схемы отражающих многослойных структур от длины волны. Попадающие в полосу пропускания зеркала линии излучения (как полезные так и побочные) будут им отражены и, пройдя через оптическую систему, попадут на детектор, повысив общий уровень сигнала. Именно поэтому зачастую в требованиях к отражательным характеристикам МЗ фигурирует ограничение на полосу пропускания $\Delta\lambda$.

Величина пикового коэффициента отражения МЗ влияет, главным образом, на временное разрешение телескопа, так как в том числе и она (наряду с входящими в состав оптической схемы фильтрами) определяет поток фотонов, достигающих в конечном счете детектора. Чем выше уровень сигнала на детекторе, тем меньшее время накопления требуется для фиксации результата, тем большим временным разрешением обладает прибор. Как правило, определенных требований к коэффициенту отражения МЗ не предъявляется. Если исходить из конкретной величины временного разрешения, то она в совокупности определяется как МЗ, так и свойствами фильтров и детекторов. Не говоря уже про уровень интенсивности изучаемой линии, который может существенно варьироваться в

зависимости от фазы солнечной активности. В общем случае условия, накладываемые на коэффициент отражения МЗ, можно сформулировать так: он должен быть как можно более высоким при заданной величине $\Delta\lambda$.

Ни одно МЗ, сведения о котором имеются в литературе, не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к отражающим покрытиям зеркал телескопов обсерватории ТЕСИС. Как правило, имея удовлетворительный коэффициент отражения, все рассмотренные структуры превышают верхний порог спектральной ширины пропускания.

Заключительная часть первой главы посвящена МЗ для проекционной литографии ЭУФ и мягкого рентгеновского диапазонов.

Для МЗ Mo/Si, служащих основой отражательных элементов литографов с рабочей длиной волны 13,5 нм выделяется две проблемы. Первая - повышение пикового коэффициента отражения. Проблема связана с многозеркальностью объектива литографа. Если в оптической схеме излучение претерпевает 10 отражений, то потеря R всего в 1% приводит к существенному снижению выходного сигнала. Например, для схемы 10 МЗ, имеющими $R=67\%$, выходной сигнал составит $0,018I_0$, где I_0 – интенсивность на входе. А для схемы с $R=68\%$ выходной сигнал уже равен $0,021I_0$, то есть потери на пятнадцать процентов меньше, что, соответственно, означает повышение на 15% производительности литографа.

Вторая проблема - компенсация упругих деформаций, вызванных наличием в структурах внутренних напряжений. Для обеспечения расчетной величины разрешающей способности объектива аберрации волнового фронта должны быть меньше $\lambda/14$, что в случае 13,5 нм уводит их в область субнанометров. Однако внутренние напряжения в осаждаемых на подложки МСС способны исказить их форму на десятки нм, что может свести на нет всю проделанную работу по формированию поверхности и не позволит достичь требуемого разрешения объектива. Именно поэтому изучение внутренних напряжений в Mo/Si структурах, их минимизация или полная компенсация является важнейшей задачей.

Для альтернативных вариантов технологии литографии (6,7 нм и 9,34 нм) предлагаются МЗ, базирующиеся на основе бора и иттрия. Нерешенной ранее проблемой для этих структур является значительное отличие экспериментальных коэффициентов отражения от теоретически возможных. При необходимых для развития технологии литографии 60% отражения на момент, предшествовавший началу экспериментов в рамках данной работы, МЗ на $\lambda=6,7$ нм имели максимальные значения $R\sim 47\%$, МЗ на $\lambda=9,34$ нм $R\sim 30\%$. При таких значениях ни о какой эффективной технологии литографии не приходится говорить. Поэтому основной задачей здесь является повышение пикового коэффициента отражения МЗ, оптимизированных на соответствующие длины волн.

Во второй главе рассматриваются МЗ нормального падения, предназначенные для построения оптических схем телескопов обсерватории ТЕСИС. ТЕСИС - комплекс телескопов, предназначенных для орбитальных наблюдений за солнечной короной. Эта обсерватория должна иметь рекордные значения спектрального, углового и временного разрешения. В рамках данной работы решалась задача разработки и синтеза МЗ для каналов регистрации 13,2 нм, 17,1 нм и 30,4 нм (узкополосного и широкополосного). Сформулированы требования к отражательным характеристикам МЗ. Прежде всего, это ограничения на спектральную полосу пропускания зеркал: $\Delta\lambda < 1$ нм для МЗ узкополосных каналов 30,4 нм и $\Delta\lambda < 0,6$ нм для МЗ каналов 17,1 нм. Кроме того, с целью минимизации aberrаций и повышения углового разрешения здесь же решается проблема пленочной асферизации ряда зеркал однозеркальных схем.

Каналы наблюдения сразу двух телескопов обсерватории ТЕСИС – FET1 и FET2 – предназначены для регистрации излучения на длине волны 17,1 нм. Лучшим базовым материалом для построения МЗ в этом диапазоне длин волн является алюминий, как имеющий наименьшее поглощение. Отбор материалов дает сразу два варианта МЗ, представляющих интерес с точки зрения поставленной задачи - это Al/Si, теоретически обладающее рекордной величиной спектральной селективности ($\Delta\lambda=0,32$ нм при $R=56\%$), и Al/Zr, теоретически имеющее наивысший коэффициент отражения ($R=71\%$ при $\Delta\lambda=0,9$ нм). Обе структуры предложены впервые и неизвестны в литературе.

Экспериментальное изучение МЗ Al/Si показало, что эти структуры действительно обладают наиболее узкой полосой пропускания в рассматриваемом диапазоне длин волн: $\Delta\lambda=0,345$ нм при $R=48\%$. Отличие характеристик от теоретически рассчитанных объясняется наличием уширенных переходных областей на границах между материалами $\sigma=0,6$ нм и уменьшенными плотностями материалов, составляющими порядка 0,93 от табличных значений.

На следующем этапе изучались свойства покрытий на основе Al/Zr. Наиболее высоким коэффициентом отражения обладает образец с толщинами материалов в периоде $d_{Zr}=3,2$ нм, $d_{Al}=5,55$ нм. В этом случае $R=56\%$ при $\Delta\lambda=0,62$ нм. Дальнейшие исследования показали, что значительное отличие параметров от теоретически предсказанных связано с межслоевой шероховатостью. При этом выявлено неравноправие случаев осаждения Al на Zr и Zr на Al. В первом случае шероховатость оценивается в 0,5 нм, во втором - 2,4 нм. Тем не менее полученный коэффициент отражения действительно превышает все известные по литературе значения при величине спектральной селективности, удовлетворяющей требованиям эксперимента ТЕСИС.

В многослойных зеркалах, предназначенных для работы в окрестности $\lambda=30,4$ нм, основной проблемой является достижение высокого и стабильного во времени коэффициента отражения. Наиболее прозрачным, а значит и подходящим для построения зеркал, материалом в этом диапазоне является Mg, а в качестве контрастного материала Si. Однако включение Mg в состав структур влечет за собой две причины снижения их коэффициентов отражения. Во-первых, уширение переходных областей на границах раздела между материалами. Во-вторых, окисление слоев Mg. В проведенной работе удалось решить эти проблемы выбором соответствующей пары барьерных слоев. К кандидатам на роль барьерных слоев предъявляются следующие требования. Первое: они должны быть относительно прозрачными в рабочем диапазоне длин волн. Второе: они должны обладать слабой химической активностью и не образовывать соединений с основными материалами структуры. В итоге предложена и синтезирована четырехкомпонентная структура Si/V₄C/Mg/Cr, имеющая стабильное значение $R=30\%$ и $\Delta\lambda=1$ нм.

Синтез предложенных МЗ позволил обсерватории ТЕСИС достичь рекордного пространственного, спектрального и временного разрешения.

В третьей главе рассматривается проблема повышения пикового коэффициента отражения МЗ Mo/Si, предназначенных для создания установок проекционной литографии с рабочей длиной волны $\lambda=13,5$ нм. Причиной несоответствия теоретически рассчитанного и экспериментально полученного отражения признано появление на границах раздела материалов структуры соединений молибдена и кремния. При этом наблюдается асимметрия границ Mo на Si и Si на Mo. В первом случае $\sigma=1-1,2$ нм, во втором $\sigma=0,5-0,6$ нм. Добиться сокращения переходной области возможно за счет осаждения барьерного слоя третьего материала, препятствующего контакту основных элементов структуры. К этому материалу предъявляются требования, аналогичные сформулированным в предыдущем разделе. Таким требованиям вполне удовлетворяет V₄C. И осаждают его необходимо на наиболее уширенную границу, то есть на слой Si. В ходе экспериментов показано, что осаждением 0,3 нм V₄C на слой Si можно добиться повышения пикового коэффициента отражения на 2,5 %.

Значительная часть главы посвящена проблеме упругих деформаций подложек с напыленным на них покрытием на основе Mo/Si. Здесь описываются применявшиеся в работе методики измерения кривизны подложек с последующим вычислением по формуле (1) величины s . Разбираются три варианта стратегии компенсации деформаций. Первый - осаждение на подложку МЗ с параметрами, обеспечивающими нулевое значение s . Однако для Mo/Si такие параметры не являются оптимальными с точки зрения максимизации коэффициента отражения. Второй путь, которым

воспользовались в [11], отжиг зеркала после синтеза. Это также приводит к снижению коэффициента отражения.

Третьим вариантом является предложенная и реализованная в этой работе методика компенсации деформаций путем помещения между подложкой и МЗ другой многослойной структуры (антистрессовой), обладающей противоположной по знаку (относительно основного МЗ) величиной внутренних напряжений. При равенстве произведений $s_{M3}D_{M3}$ и $s_{пл}D_{пл}$, где s_{M3} и $s_{пл}$ – внутренние напряжения в отражающем покрытии и пленке, D_{M3} и $D_{пл}$ – суммарная толщина отражающего покрытия и пленки, воздействия на подложку МЗ и антистрессовой структуры будут уравнивать друг друга.

Работоспособность этой методики продемонстрирована на примере компенсации упругих деформаций, вызываемых наличием внутренних напряжений в МЗ Mo/Si. В качестве антистрессовой предложена многослойная структура Cr/Sc. Экспериментально показано, что деформация, вызываемая системой [Cr/Sc]/[Mo/Si], не превышает 1,3% от деформации, вызываемой осаждением одного лишь Mo/Si.

Четвертая глава посвящена изучению возможности создания высокоотражающих многослойных зеркал для построения на их основе установок проекционной литографии с рабочей длиной волны меньше 10 нм. Наиболее вероятными рабочими диапазонами являются края поглощения иттрия ($\lambda=9,34$ нм) и бора ($\lambda=6,63$ нм). Соответственно, на базе этих материалов и следует строить отражающие покрытия.

В первой части главы изучаются МЗ, базирующиеся на иттрии и оптимизированные на $\lambda=9,34$ нм. Теоретически наибольшими пиковыми (и интегральными) коэффициентами отражения, достигающими 62%, обладают МЗ на основе Pd/Y и Ag/Y. Ru/Y-зеркала немного в этом им уступают (R до 56%), а МЗ Mo/Y имеют лишь 42% при значительно более узкой полосе пропускания. Экспериментально изучены МЗ Mo/Y и Ru/Y. Их коэффициенты отражения (29,6% и 32%, соответственно) оказались значительно ниже теоретически рассчитанных. Применение методики барьерных слоев (на основе C и B₄C) незначительно повышает эти значения: для Mo/Y/B₄C R=31,9%, для Y/C/Ru R=33,5%. При этом впервые предложенная структура Ru/Y с барьерными слоями на основе C демонстрирует рекордное значение пикового коэффициента отражения.

В случае борсодержащих МЗ, оптимизированных на окрестность $\lambda=6,7$ нм также существует проблема значительного несоответствия теоретических расчетов и экспериментальных результатов: коэффициент отражения лучших образцов МЗ La/B₄C не превышает 40-44% при теоретическом пределе 70%. Основной причиной такого несоответствия является уширение переходных границ в МЗ. При этом выявлена асимметрия переходных

областей: для La-на-В₄С $\sigma=0,75$ нм, для В₄С-на-La $\sigma=0,35$ нм. В качестве меры противодействия предложен метод осаждения барьерного слоя. Эксперименты с Cr, Sc, Mo, Sn не дали положительного эффекта. Наиболее подходящим стал С. Осаждение 0,3 нм С на поверхность слоев В₄С в МЗ позволило достичь рекордных 58% отражения на длине волны $\lambda=6,663$ нм. Этот результат дает основания заявить о перспективности развития технологии литографии с рабочей длиной волны λ около 6,7 нм.

Основные результаты работы

1. Для работы в диапазоне длин волн больших 17,1 нм предложены и синтезированы многослойные зеркала на основе Al/Zr и Al/Si, обладающие рекордными коэффициентами отражения и величиной спектральной селективности.

2. Предложены, синтезированы и изучены магнийсодержащие зеркала: Mg/Cr, Mg/Si и Mg/Si с антидиффузионными слоями на основе карбида бора и хрома. Показано, что четырехкомпонентная структура Si/В₄С/Mg/Cr обладает наиболее стабильными во времени отражательными характеристиками и рекордной величиной спектральной селективности в окрестности длины волны 30,4 нм.

3. На основе многослойных структур Mo/Si, Al/Zr и Si/В₄С/Mg/Cr изготовлены комплекты многослойных зеркал как с асферизирующим покрытием, так и без него для оптических схем телескопов обсерватории ТЕСИС, позволившие получить изображения солнечной короны в нескольких спектральных линиях с рекордным угловым (1,7") и временным разрешением (1 с).

4. Изучено влияние антидиффузионных слоев карбида бора на оптические свойства многослойных зеркал Mo/Si, оптимизированных на длину волны $\lambda=13,5$ нм. Продемонстрирована возможность увеличения коэффициента отражения на 2,5 процента.

5. Изучены внутренние напряжения многослойных структур Mo/Si, Mo/Si/В₄С и Cr/Sc. Предложена методика компенсации упругих деформаций Mo/Si зеркал с помощью антистрессовой Cr/Sc многослойной структуры. Продемонстрирована остаточная деформация на уровне единицы процента от исходной.

6. Впервые синтезированы и изучены Mo/Y и Ru/Y многослойные зеркала с антидиффузионными слоями. В окрестности длины волны $\lambda=9,5$ нм при нормальном падении получены рекордные коэффициенты отражения.

7. Изучены свойства многослойных зеркал на основе La/В₄С, предназначенных для создания оптических элементов схем проекционной литографии следующего поколения с рабочей длиной волны около $\lambda=6,7$ нм. Показано, что осаждение тонких слоев углерода обеспечивает сни-

жение ширины переходных областей в зеркалах La/B₄C. Это позволило достичь рекордного коэффициента отражения R=58,3% на длине волны $\lambda=6,663$ нм.

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. Андреев, С.С. Компенсация упругих деформаций многослойных Mo/Si-структур, нанесенных на подложки из кварца и зеродура, посредством буферных Cr/Sc-слоев / С.С. Андреев, Е.Б. Клюенков, А.Л. Мизинов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Л.А. Суслов, В.В. Чернов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - №.2. - С.45-48.

A2. Андреев, С.С. Многослойные дисперсионные отражательные элементы на основе Mg, предназначенные для работы на длине волны 30,4 нм / С.С. Андреев, С.Ю. Зуев, А.Л. Мизинов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2005. - №.8. - С.9-12.

A3. Климов, А.Ю. Экспериментальные исследования возможностей интерферометра с дифракционной волной сравнения для контроля формы оптических элементов / А.Ю. Климов, Е.Б. Клюенков, 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.

A4. 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.116-124.

A5. Клюенков, Е.Б. Коррекция формы оптических поверхностей с субнанометровой точностью. Проблемы, статус, перспективы / Е.Б. Клюенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2008. - Т.72.№2. - С. 205-208.

A6. Chkhalo, N.I. Manufacturing of XEUV mirrors with subnanometer surface shape accuracy / N.I. Chkhalo, E.B. Klunokov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.G. Raskin, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, M.N. Toropov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2009. - V.603.№.1 – 2. - P. 62-65.

A7. Andreev, S.S. Multilayered mirrors based on La/B₄C(B₉C) for x-ray range near anomalous dispersion of boron (λ near 6.7 nm) / S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2009. - V.603.№.1-2. - P. 80-82.

A8. Зуев, С.Ю. Элементы отражающей оптики для решения задач рентгеновской астрофизики в рамках эксперимента ТЕСИС / С.Ю. Зуев, С.В. Кузин, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко // Известия РАН. Серия физическая. - 2010. - Т.74.№.1. - С. 58-61.

A9. Андреев, С.С. Многослойные зеркала на основе La/B4C и La/B9C для спектральной области аномальной дисперсии бора (длин волны 6.7 нм) / С.С. Андреев, М.М. Барышева, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салашенко, Ю.А. Вайнер, С.Ю.Зуев // Журнал технической физики. - 2010. - Т.80.№.8. - С.93-100.

A10. Дроздов, М.Н. Использование кластерных вторичных ионов для минимизации матричных эффектов при послыном анализе многослойных наноструктур La/B4C методом ВИМС / М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, М.М. Барышева, В.Н.Полковников, Н.И.Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2010. - №.10. - С.14–18.

A11. Пестов, А.Е. Система освещения маски ЭУФ нанолитографа / А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, А.С. Скрыль, И.Л. Струля, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2010. - №.10. - С.10–13.

A12. Дроздов, М.Н. Послойный анализ многослойных металлических структур Pd/B₄C, Ni/C, Cr/Sc методом ВИМС с использованием кластерных вторичных ионов: проблема повышения разрешения по глубине / М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, М.М. Барышева, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2011. - Т.75.№.1. - С.106-111.

A13. Зуев, С.Ю. Технологический комплекс для изготовления прецизионной изображающей оптики / С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.Н. Салашенко, Л.А. Суслов, Н.И. Чхало. // Известия РАН. Серия физическая. - 2011. - Т.75.№.1. - С.57-60.

A14. Волгунов, Д.Г. Стенд проекционного ЭУФ-нанолитографамультипликатора с расчётным разрешением 30 нм / Д.Г. Волгунов, И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Л.А. Суслов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Известия РАН. Серия физическая. - 2011. - Т.75.№.1. - С.54-56.

A15. Кузин, С.В. Выбор материалов оптики для диагностики атмосферы Солнца в диапазоне длин волн 6-60 нм / С. В. Кузин, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко. // Известия РАН. Серия физическая. - 2011. - Т.75.№.1. - С.88-91.

A16. Слемзин, В.А. Эксперимент ТЕСИС космического аппарата «Коронас-Фотон» / Слемзин В.А., Суходрев Н.К., Иванов Ю.С., Гончаров А.Л., Митрофанов А.В., Попова С.Г., Шергина Т.А., Соловьев В.А., Опа-

рин С.Н., Лучин В.И., Полковников В.Н., Салашенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Кузин С.В., Житник И.А., Шестов С.В., Богачев С.А., Бугаенко О.И., Игнатъев А.П., Перцов А.А. // *Механика, управление и информатика*. - 2012. - № 7. - С. 41-60.

A17. Дроздов, М.Н. Новая альтернатива вторичным ионам CsM⁺ для послойного анализа многослойных металлических структур методом вторично-ионной масс-спектрометрии / М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.Н. Полковников, С.Д. Стариков, П.А. Юнин // *Письма в ЖТФ*. - 2012. - Т.38№.24 - С.75.

A18. Аруев, П.Н. Кремниевый фотодиод для экстремального ультрафиолетового диапазона спектра с селективным Zr/Si-покрытием / П.Н. Аруев, М.М. Барышева, Б.Я. Бер, Н.В. Забродская, В.В. Забродский, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, М.В. Петренко, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, В.Л. Суханов, Н.И. Чхало // *Квантовая Электроника*. – 2012. – т.42. – №10. – с.943-948.

A19. Гусев, С.А. Отражательная маска для проекционной литографии на длине волны 13.5 нм / С.А. Гусев, С.Ю. Зуев, А.Ю. Климов, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, В.В. Рогов, Н.Н. Салашенко, Е.В. Скороходов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2012. – №6. – С.20.

A20. Chkhalo, N.I. High performance La/B₄C multilayer mirrors with barrier layers for the next generation lithography / N. I. Chkhalo, S. Kunstner, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, F. Schafers, S. D. Starikov. // *Appl. Phys. Lett.* - 2013. - V.102. - P.011602-1.

A21. Барышева, М.М. Многослойные зеркала La/B₄C для спектральной области вблизи 6,7 нм. / М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, С.Д. Стариков // *Известия РАН. Серия физическая*. - 2013. - Т.75. №1 - С. 88-91.

A22. Забродин, И.Г. Установка магнетронного и ионно-пучкового напыления многослойных структур / И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Клюенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2013. – №7. – С.1.

A23. Ber, V. Sputter depth profiling of Mo/B₄C/Si and Mo/Si multilayer nanostructures: A round-robin characterization by different techniques / V. Ber, P. Bátor, P.N. Brunkov, P. Chapon, M.N. Drozdov, R. Duda, D. Kazantsev, V.N. Polkovnikov, P. Yunin, A. Tolstogousov. // *Thin Solid Films*. - 2013. - V.540. - P. 96–105.

Список литературы

1. Барышева, М.М. Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового

диапазонов / М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // УФН. – 2012. – Т. 182. – с. 727–747.

2. Слемзин, В.А. Исследование временной стабильности характеристик многослойных рентгеновских зеркал для солнечного рентгеновского телескопа СРТ-К и спектрометра РЕС-К / В.А. Слемзин, И.А. Житник, С.Ю. Зуев, С.В. Кузин, А.В. Митрофанов // Поверхность. – 2002. - №1. – с. 84-86.

3. Haran, B. 22nm technology compatible fully functional 0.1 μm^2 6T-SRAM cell / B. Haran, L. Kumar, L. Adam, J. Chang, S. Basker Kanakasbapathy, D. Horak, S. Fan, J. Chen // IEDM Proc. – 2008. – p. 625.

4. Hawryluk, A.M. Wavelength considerations in soft xray projection lithography / A.M. Hawryluk, N.M. Ceglio // Appl. Optics. - 1993. - V. 32. - № 34. - P. 7062.

5. Barbee, T. W. Molybdenum-silicon multilayer mirrors for the extreme ultraviolet / Troy W. Barbee, Jr., Stanley Mrowka, and Michael C. Hettrick // Applied Optics. – 1985. – V. 24. - №6. – p. 883-886.

6. Andreev, S.S. The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers / S.S. Andreev, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, M.N. Haidl, E.B. Klunokov, K.A. Prokhorov, N.I. Polushkin, E.N. Sadova, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, S.Yu. Zuev // Thin Solid Films. – 2002. – V. 415. – p. 123-132.

7. Meltchakov, E. EUV reflectivity and stability of tri-component Al-based multilayers / E. Meltchakova, A. Ziani, F. Auchere, X. Zhang, M. Roulliy, S. De Rossi, Ch. Bourassin-Bouchet, A. Jérôme, F. Bridou, F. Varniere and F. Delmotte // Proc. SPIE. - 2011. - V.8168. - P.816819-1-816819-9.

8. Windt, D.L. EUV Multilayers for Solar Physics / D. L. Windt, S. Donguy, J. Seely, B. Kjornrattanawanich, E. M. Gullikson, C. C. Walton, L. Golub, and E. DeLuca // Proc. SPIE. - 2004. - V.5168. - P.1-11.

9. Windt, D.L. EUV Multilayers for Solar Physics / D. L. Windt, S. Donguy, J. Seely, B. Kjornrattanawanich, E. M. Gullikson, C. C. Walton, L. Golub, and E. DeLuca // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5168.

10. Platonov, Y. Multilayers for next generation EUVL at 6.Xnm / Yuriy Platonov, Jim Rodriguez, Michael Kriese, Eric Gullikson, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita // Proc. SPIE. – 2011. – Vol. 8076. – p. 80760N-1.

11. Montcalm, C. Reduction of residual stress in extreme ultraviolet Mo/Si multilayer mirrors with postdeposition thermal treatments / C. Montcalm // Opt. Eng. - 2001. - V.40.№3. - P.469-477.

Полковников Владимир Николаевич

**МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ
АСТРОНОМИИ И ПРОЕКЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ**

Подписано к печати 31.10.2013 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105