

На правах рукописи

Плешков Роман Сергеевич

**МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ
БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 1.3.2 – 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 – 2022 г.

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Института прикладной физики Российской академии наук»

- Научный руководитель: **Чхало Николай Иванович**
доктор физико-математических наук,
ИФМ РАН, г. Нижний Новгород
- Официальные оппоненты: **Горай Леонид Иванович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный
исследовательский академический университет
им. Ж. И. Алфёрова РАН», г. Санкт-Петербург
- Кузин Сергей Владимович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт солнечно-земной
физики СО РАН», г. Иркутск
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физический институт
им. П. Н. Лебедева РАН», г. Москва

Защита состоится «2» марта 2023 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Институте физики микроструктур РАН - филиале ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Института прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603087, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте
http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2022_PleshkovRS/Diss_PleshkovRS.pdf

Автореферат разослан «1» февраля 2023 г.

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

Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Интерес к рентгеновским многослойным зеркалам (МЗ) обусловлен использованием их в качестве дисперсионных элементов для рентгеновской спектроскопии, микроскопии, литографии, элементного флуоресцентного анализа, диагностики высокотемпературной плазмы, для коллимации, фокусировки рентгеновского излучения, а также для других приложений. Особый интерес представляют МЗ нормального падения для изображающих схем нанометрового разрешения, применяемых для изучения короны Солнца, микроскопии и литографии. Развитие многослойной оптики мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) спектральных диапазонов подразумевает непрерывное улучшение рентгенооптических свойств МЗ: пиковых и интегральных коэффициента отражения, спектральной селективности и ряда других параметров. На сегодняшний день для известных и используемых на практике сочетаний материалов достигнуты или почти достигнуты предельные величины во всем рассматриваемом диапазоне длин волн. В качестве возможных методик по улучшению оптических характеристик МЗ могут выступать: применение барьерных слоев, ионная полировка пленок, ионное ассистирование, дающие приращение коэффициента отражения на единицы процента. Получение многослойных структур качественно иного уровня с улучшенными рентгенооптическими характеристиками может дать использование новых материалов.

В данной диссертационной работе исследуются возможности использования бериллия для улучшения параметров МЗ. Возможность проведения систематических исследований с бериллием обусловлена появившейся в 2014 г. в Институте физики микроструктур РАН лаборатории, сертифицированной для работы с бериллием. Перспективы получения результатов мирового уровня обусловлены следующими обстоятельствами. Во-первых, было общепринятым, что бериллий может представлять интерес для многослойной рентгеновской оптики только в качестве слабо поглощающего материала. Однако, как показала практика, в этом качестве, за исключением диапазона длин волн 11,1–12,4 нм, область между краями поглощения Be K и Si L, его применение не дает каких-либо качественных улучшений отражательных характеристик МЗ. С учетом ужесточения современных санитарных норм, работы по напылению Be практически остановились по всему миру. Однако в ранних работах (1980-1990-х гг) был изучен крайне ограниченный набор сочетаний материалов и слабо развита технология повышения качества переходных границ.

Во-вторых, в довольно свежей работе [1] и теоретически, и экспериментально было показано, что в области длин волн $\lambda > 17$ нм Be возможно использовать в качестве «рассеивающего» материала в пару к таким материалам, как Al и Mg.

Благодаря достаточно высокой рассеивающей способности и низкому поглощению бериллия в этой работе удалось получить рекордные значения коэффициентов отражения и спектральных селективностей МЗ.

Поэтому исследование бериллийсодержащих МЗ и применение современных технологий управления интерфейсами и оксидизацией верхних слоев является крайне актуальной задачей для дальнейшего развития многослойной рентгеновской оптики.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является разработка, синтез и изучение свойств Ве-содержащих многослойных зеркал, предназначенных для рентгеновской астрономии, проекционной ЭУФ литографии и синхротронных исследований.

Для достижения цели диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Разработка методов синтеза и изучение внутренней микроструктуры и оптических свойств многослойных зеркал Mo/Si с барьерными слоями Ве и В₄С, предназначенных для проекционной литографии с рабочей длиной 13,5 нм. Минимизация ширины переходных областей на границах раздела материалов с целью увеличения пикового коэффициента отражения зеркал.

2. Разработка методов синтеза и изучение микроструктуры и отражательных свойств Ве-содержащих многослойных зеркал для спектральной области 17–30 нм. Определение их предельных рентгенооптических характеристик и изготовление комплектов зеркал для телескопа наноспутника, предназначенного для исследования короны Солнца в ЭУФ диапазоне.

3. Разработка, синтез и изучение внутренней микроструктуры и отражательных свойств короткопериодных Ве-содержащих многослойных зеркал для мягкого и жесткого рентгеновского диапазонов длин волн. Определение возможности создания высокоотражающих многослойных покрытий с экстремально малой величиной периода.

Научная новизна работы

1. Впервые синтезированы и исследованы многослойные зеркала на основе Ве/Si/Al для длин волн $\lambda > 17,1$ нм. Данные МЗ обладают рекордными коэффициентом отражения и спектральной селективностью.

2. Впервые предложены, синтезированы и исследованы многослойные зеркала Ве/Mg с защитным верхним слоем Al, предназначенные для работы в диапазоне длин волн 25–40 нм. Показано, что структура [Ве/Mg]/Al_{cap} обладает стабильными во времени отражательными характеристиками и одновременно рекордным пиковым коэффициентом отражения.

3. Впервые показано, что использование бериллия в качестве барьерного слоя на границе Si-на-Mo в Mo/Si зеркалах приводит к увеличению коэффициента

отражения в окрестности длины волны 13,5 нм в относительном выражении на 2,8%.

4. Впервые предложены, синтезированы и исследованы многослойные зеркала Cr/Be. Методами рентгеновской рефлектометрии и диффузного рассеяния показано, что при уменьшении периода многослойных зеркал Cr/Be с 2,2 нм до 0,8 нм ширина переходных слоев и межслоевая шероховатость не изменяются и остаются на уровне 0,33 и 0,2 нм, соответственно.

Практическая значимость работы

Полученные в диссертации научные результаты имеют большое практическое значение.

1. На основе многослойной структуры Be/Si/Al изготовлены комплекты полетных многослойных зеркал с рекордными оптическими характеристиками для оптических схем телескопов, устанавливаемых на наноспутники, а также дисперсионные элементы для флуоресцентного анализа в ультрамягком рентгеновском диапазоне.

2. Увеличение коэффициента отражения Mo/Si многослойных зеркал на относительные 2,8% и полосы отражения на полувысоте спектральной зависимости коэффициента отражения на 5,6% за счет использования антидиффузионных слоев Be и V_4C может найти применение в литографических установках на длине волны 13,5 нм, так как в 11-ти зеркальной системе можно ожидать увеличение эффективности рентгенооптической схемы литографических установках на длине волны 13,5 нм почти в 1,4 раза.

3. Возможность достижения ультратонких, менее 1 нм, периодов Cr/Be многослойных зеркал указывает на большие перспективы этой многослойной системы в синхротронных и спектроскопических исследованиях.

Методология и методы исследований

Объектами для исследования стали многослойные периодические системы Mo/Si, Mo/Be/Si, Mo/Be/Si/ V_4C , Al/Be, Al/Be/Si, Al/Si/Be/Si, Mg/Be, Mg/Be/Al_{cap}, Cr/Be, W/Be и тонкие пленки данных материалов.

Все многослойные зеркала, представленные в этой диссертации, были синтезированы методом магнетронного напыления в специализированной бериллиевой лаборатории ИФМ РАН. Синтез структур осуществлялся при постоянном токе на установке, оснащенной шестью магнетронами планарного типа. Каждый магнетрон представляет собой источник с кольцевым разрядом. На поверхности расположена мишень распыляемого материала диаметром 150 мм и толщиной 5–6 мм. В качестве рабочей среды использовался высокочистый (99,998%) газ аргон. Характерные значения скорости роста пленок составляют порядка 0,1–1 нм/сек. В ходе процесса синтеза подложка крепится на

вращающемся диске, расположенном над магнетронами. Подложка последовательно проходит над работающими магнетронами. Толщины пленок контролируются изменением тока разряда и временем нахождения подложки над конкретным магнетроном. Для обеспечения равномерности покрытия по площади подложки над каждым магнетроном расположены фигурные прецизионные диафрагмы. Изменяя их форму можно контролировать распределение плотности потока вещества, поступающего на подложку. Точность управления распределением периода по площади зеркала составляет величину порядка 0,5% от величины периода.

Основные параметры многослойных зеркал, такие как период, толщины индивидуальных слоев, межслойные шероховатости, определялись по результатам малоугловой рентгеновской рефлектометрии и рефлектометрии в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн. Измерения методом малоугловой рентгеновской рефлектометрии проводили с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalytical X'Pert Pro ($\lambda = 0,154$ нм). В лаборатории измерения в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн проводились на: 1) рефлектометре с монохроматором РСМ-500 [2]; 2) рефлектометре с двумя монохроматорами (РСМ-500 и ЛНТ-30), которые соединены с одной камерой гониометра [3]; 2) рефлектометре со спектрометром Черни-Тюрнера и широкополосным лазерно-плазменным источником, позволяющим проводить измерения в диапазоне 5–50 нм [4]. Измерения на целевых длинах волн также проводились на рефлектометре, расположенном на оптической линии синхротрона BESSY-II [5].

Изучались угловые (при фиксированной энергии фотонов) и спектральные (при фиксированном угле падения излучения) зависимости коэффициентов отражения (R) МЗ. Параметры структур определялись методом одновременной подгонки кривых отражения, снятыми на длине волны 0,154 нм и на рабочей длине волны, с использованием модели восстановления структурных параметров многослойных зеркал по данным рентгеновского отражения [6].

Личный вклад автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, изготовление и исследование образцов, анализ и обобщение полученных результатов. Работы по изучению свойств многослойных зеркал Be/Si/Al, Be/Mg/Al_{cap} и Mo/Be/Si/B₄C сопровождалась измерениями на синхротроне BESSY-II при участии А. Соколова. Анализ внутренней структуры МЗ Cr/Be с различными величинами периодов осуществлялся при участии М.В. Свечникова. Многослойные зеркала Be/Si/Al для наноспутников были изготовлены автором. Анализ структур Mo/Si и Cr/Be с барьерными слоями и без них с помощью метода рентгеновской

фотоэлектронной спектроскопии проводился группой из СПбГУ под руководством Е.О. Филатовой. Анализ структур Mo/Be и W/Be с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния проводился Н. Кумаром.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение прослоек кремния приводит к уменьшению ширины переходных слоев в Be/Al многослойных зеркалах, что позволяет достичь рекордных коэффициентов отражения, до $R=62,5\%$, и спектральной селективности, до $\lambda/\Delta\lambda=59$, в диапазоне длин волн 17,1–30,4 нм.

2. Применение защитного слоя Al обеспечивает долговременную стабильность и рекордные коэффициенты отражения в окрестности длины волны 30,4 нм, до $R=56\%$, Be/Mg многослойных зеркал.

3. Барьерные слои бериллия и карбида бора уменьшают ширины переходных слоев, что позволяет увеличить коэффициенты отражения на 2,8% и спектральную ширину полосы отражения на 5,6% многослойных Mo/Si зеркал на длине волны $\lambda=13,5$ нм.

4. Короткопериодные многослойные зеркала Cr/Be сохраняют неизменными ширины переходных слоев, около 0,33 нм, в диапазоне периодов 0,8–2,2 нм.

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:

Оптические характеристики впервые синтезированного короткопериодного многослойного зеркала W/Be, предназначенного для работы в модернизированной версии двухзеркального монохроматора, установленного на синхротроне ВЭПП-5, Института ядерной физики им. Г.И. Будкера, обсуждались на XXII симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2018 г. и на конференции «Рентгеновская оптика – 2018», г. Черноголовка, 2018 г.

О влиянии антидиффузионных слоев Be на отражательные характеристики Mo/Si-зеркал сделан доклад на XXIII симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2019 г.

Результаты работы по изучению влияния аморфизирующих промежуточных слоев и защитного покрытия на отражательные характеристики и по изучению временной стабильности Be-содержащих многослойных зеркал (Be/Si/Al, Be/Mg/Al_{cap}) для диапазона длин волн 17–45 нм докладывались на XXIV симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2020 г.

Результатам исследования в области создания высокоотражающих многослойных зеркал для синхротронного излучения с энергиями выше 8 кэВ были посвящены доклады на XXV и XXVI симпозиумах «Нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 2021 и 2022 гг., на объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черноголовка, 2021 г.

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 137 страницах, содержит 115 наименований библиографии, 52 рисунка и 10 таблиц.

Во введении приводится современное состояние исследований в области многослойных рентгеновских зеркал для таких приложений, как рентгеновская и ЭУФ астрофизика и проекционная литография, излагаются проблемы, связанные с созданием многослойных зеркал для данных приложений, обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка задачи исследования. Формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации. Указывается структура и объем диссертации и публикации по теме в журналах и сборниках.

В первой главе дается краткий обзор принципа действия и метода расчета отражательных характеристик МЗ. В первом пункте показывается, как следует выбирать материалы для формирования структуры МЗ и принцип подбора его оптимальных параметров для обеспечения сочетания высокого коэффициента отражения и требуемой величины спектральной селективности. Обсуждается использование бериллия в качестве одного из материалов МЗ. Отмечается, что бериллий является одним из самых слабопоглощающих («легких») материалов рентгеновского и ЭУФ диапазонов, обладает довольно гладкими дисперсионными зависимостями, что даёт возможность создавать высокоотражающие многослойные зеркала в довольно широком спектральном диапазоне излучения. Также указывается альтернативный подход к созданию МЗ, в котором бериллий используется в качестве не «легкого», а рассеивающего материала в паре с рядом других «легких» материалов: Si, Al, Mg.

Во втором параграфе первой главы следует обзор МЗ, синтезированных по классической схеме для решения задач солнечной рентгеновской астрономии. Корона Солнца представляет большой интерес, как с точки зрения фундаментальной физики [7], так и прикладных исследований («космическая погода» [8]). Особое внимание в таких исследованиях уделяется вопросу о причинах сильного нагрева (до $2 \cdot 10^6$ К [9]) солнечной короны, наиболее удаленной от ядра участка атмосферы Солнца.

Наблюдения за короной в основном ведется с помощью метода изображающей спектроскопии мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов. В настоящее время всё более распространенной платформой для таких исследований становятся наноспутники, в частности спутники стандарта CubeSat [10, 11]. В данном пункте основное внимание уделено МЗ, предназначенным для регистрации изображения солнечного диска на интенсивных монохроматических линиях ионов, соответствующим длинам волн 17,1 нм и 30,4 нм, в узких интервалах спектра. Отмечается важность таких оптических параметров МЗ, как пиковый коэффициент отражения (R) и спектральная селективность ($\lambda/\Delta\lambda$). Оба эти параметра должны быть как можно больше. Более узкая полоса отражения МЗ ($\Delta\lambda$), необходима для детектирования целевых линий спектра без получения дополнительного сигнала от фоновых линий. В [12, 13] обозначены требования к современным обсерваториям: $\Delta\lambda < 0,42$ нм для длины волны 17,1 нм и $\Delta\lambda < 1,2$ нм для 30,4 нм. Классические зеркала не способны обеспечить одновременное сочетание высоких R и $\lambda/\Delta\lambda$. Для решения этих проблем требуется поиск новых подходов и новых составов.

В третьем пункте рассматриваются МЗ для проекционной литографии с рабочей длиной волны 13,5 нм (ЭУФ-литография). В схемах литографов количество отражающих элементов может достигать 11-ти [14]. В связи с этим остро встает проблема повышения коэффициента отражения, как пикового (R), так и интегрального (учитывается спектральная ширина $\Delta\lambda$). Указывается, что даже небольшое увеличение одновременно R (например, с 70% до 72%) и $\Delta\lambda$ (например, с 0,5 нм до 0,54 нм) может привести к значительному повышению эффективности литографической установки (до 40% для указанных значений). Основной парой материалов МЗ, максимально отражающего излучение с длиной волны 13,5 нм, являются Mo и Si. Наиболее действенным способом увеличения коэффициентов отражения многослойных зеркал Mo/Si признана методика барьерных слоев. В результате максимальный коэффициент отражения для структур типа Mo/B₄C/Si/B₄C и Mo/Si/C составил 70,15% ($\Delta\lambda = 0,52$ нм) на длине волны 13,5 нм [15]. В [16] для МЗ Mo/Be/Si экспериментально достигнуты коэффициенты отражения более 71% при $\lambda = 13,5$ нм и более 72% при $\lambda = 12,9$ нм при этом $\Delta\lambda$ составила 0,5 нм (бериллий использован в качестве «легкого» материала, а кремний как сглаживающий барьерный слой). Проблема при этом заключается в том, что, выбирая любое из приведенных МЗ, приходится жертвовать либо пиковым коэффициентом отражения, либо спектральной шириной, что снижает эффективность литографических установок. Данный факт неизбежно подталкивает к поиску новых составов МЗ.

Заключительный пункт первой главы посвящен короткопериодным многослойным зеркалам для мягкого и жесткого рентгеновского диапазона. В качестве области применения таких зеркал рассматриваются различные приложения с использованием синхротронного излучения. В данной области для значительной части экспериментов с использованием синхротронного излучения также в числе важных требований к МЗ находятся высокие пиковые и интегральные коэффициенты отражения, при этом достаточным является спектральное разрешение на уровне

$\lambda/\Delta\lambda \sim 100$. Современные задачи требуют расширения рабочего диапазона, как в коротковолновую, так и длинноволновую области. В мягком рентгеновском диапазоне наиболее проблемной является область длин волн $\lambda=2,3-3,1$ нм. В этой области традиционные слабопоглощающие материалы бор, углерод и кремний достаточно сильно поглощают, поэтому МЗ на их основе имеют низкие (менее 10%) коэффициенты отражения. Высоких коэффициентов отражения можно достичь только в узких областях вблизи краев поглощения Ti ($\lambda=2,74$ нм, МЗ Cr/Ti [17]) и V ($\lambda=2,4$ нм, МЗ Cr/V [18]). Поэтому актуальной задачей является поиск такого сочетания материалов, которые позволили бы создать МЗ, эффективно отражающее на длинах волн, расположенных между такими узкими областями. Также рассматривается проблема уменьшения периода многослойного зеркала, связанная с конструктивными особенностями синхротронов. Увеличение светосилы измерительных приборов, расширение диапазона периодов в рамках одного многослойного зеркала, повышение энергии синхротронных источников, приводят к необходимости такого уменьшения. При этом влияние шероховатости межслоевых границ на коэффициент отражения, как и сама её величина, может резко возрастать. Известно, что у широко используемых в области длин волн 0,683–2,3 нм МЗ W/Si и W/B₄C [19, 20] наблюдается резкое увеличение геометрической шероховатости, и, как следствие, падение коэффициента отражения. К примеру, у W/B₄C это происходит при уменьшении периода до 1,1–1,2 нм [21]. Для ряда задач в жестком рентгеновском диапазоне недостатком W/B₄C является её недостаточная селективность. Наличие ряда L-краев поглощения W в области 10–12 кэВ приводит к падению коэффициентов отражения, W-содержащих МЗ, предназначенных для работы в широкой спектральной области 10–18 кэВ, одной из наиболее востребованных областей в современных синхротронных исследованиях, например, планируемых работах на синхротроне 4-го поколения СКИФ [22]. Поэтому поиск новых систем, обеспечивающих большие коэффициенты отражения и спектральную селективность при тех же, или даже меньших значениях периода, является крайне актуальным.

Во второй главе, в первом пункте, приводится информация об аппаратуре для синтеза бериллийсодержащих многослойных структур и методики измерения характеристик МЗ. Описывается 6-ти магнетронная установка: её составные части, особенности конструкции, режимы работы. В качестве методов аттестации МЗ приводятся малоугловая рентгеновская рефлектометрия на длине волны 0,154 нм и рефлектометрия в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн. Описывается методика восстановления параметров исследуемых структур с помощью одновременной подгонки кривых отражения, снятыми на длине волны 0,154 нм и на рабочей длине волны, с использованием модели восстановления структурных параметров многослойных зеркал по данным рентгеновского отражения [6].

Во втором пункте представлены результаты исследований многослойных зеркал Mo/Si с межслоевыми прослойками B₄C и Be в окрестности длины волны 13,5 нм.

После анализа эффективно отражающих на данной длине волны МЗ важным выводом стало следующее утверждение. Использование B_4C на наиболее проблемной границе Mo-на-Si и Be барьерной толщины на другой границе позволило уменьшить величины переходных областей между слоями. Это привело к увеличению пикового коэффициента отражения, а малая толщина бериллия позволила оставить величину спектральной ширины на высоком уровне. Таким образом, показано, что четырехкомпонентное многослойное зеркало типа Mo/Be/Si/ B_4C по коэффициенту отражения превосходит двухкомпонентное МЗ Mo/Si на 1,9 абсолютных процента (на 2,8 относительных процентов). При этом важно заметить, что ширина пика отражения на половине высоты для зеркала Mo/Be/Si/ B_4C оказывается максимальной и составляет 0,535 нм. На рис. 1 приведены экспериментально полученные спектральные зависимости коэффициента отражения для исследуемых в работе образцов.

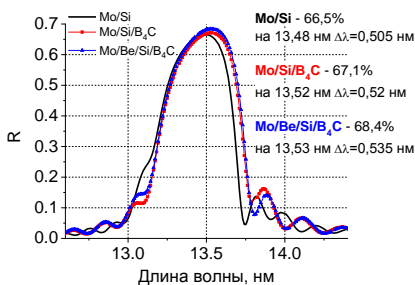


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал Mo/Si, Mo/Si/ B_4C и Mo/Be/Si/ B_4C . Угол падения излучения 2° от нормали.

Дополнительно приведена оценка интегральных коэффициентов отражения исследуемых зеркал в случае использования их в 11-зеркальной схеме литографической установки. На рис. 2 сравниваются интегралы под спектральными зависимостями коэффициентов отражения после прохождения излучения через такую оптическую схему для исследуемых многослойных зеркал Mo/Si, Mo/Si/ B_4C и Mo/Be/Si/ B_4C . Можно увидеть, что при переходе, например, от МЗ Mo/Si ($R=66,5\%$; $\Delta\lambda=0,505$ нм) к Mo/Be/Si/ B_4C ($R=68,4\%$; $\Delta\lambda=0,535$ нм) интегральный коэффициент отражения 11-зеркальной схемы увеличится на 44 %.

Таким образом, одновременное использование бериллия и карбида бора в качестве барьерных материалов действительно приводит к росту как пикового значения, так и полуширины коэффициента отражения многослойных зеркал на основе Mo/Si.

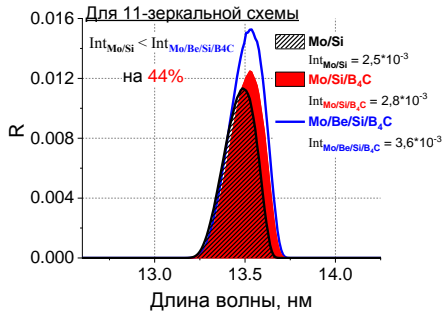


Рис. 2. Сравнение интегральных коэффициентов отражения 11-зеркальной схемы, посчитанных по экспериментальным спектральным зависимостям коэффициентов отражения для исследуемых зеркал Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C (Рис. 1).

Для исследования микроструктуры Be слоев разной толщины применялось комбинационное рассеяние видимого света в многослойных зеркалах Mo/Be [A12, A22, A23]. Наблюдалась трансформация структуры Be в зависимости от его толщины, изменяющейся в диапазоне 0,5–5,5 нм. Исследование спектров комбинационного рассеяния показало, что слои бериллия в МЗ Mo/Be имеют полностью аморфную структуру вплоть до толщины слоя 2,4 нм. Так как в исследуемых МЗ Mo/Be/Si/B₄C слои Be имеют «барберную» толщину (до 1 нм), можно считать, что они имеют аморфную структуру.

Выводы об изменении интерфейсов и порядке нанесения материалов в Mo/Be/Si/B₄C МЗ, сделанные на основе данных рентгеновской рефлектометрии, были полностью подтверждены с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Так же метод РФЭС позволил объяснить физико-химические механизмы на границах, приведшие к повышению качества интерфейсов и, соответственно, коэффициентов отражения. Показано, что прослойка Be химически взаимодействует только с молибденом (образуется бериллид MoBe₁₂), тем самым предотвращая образование силицида MoSi₂.

В третьей главе, в рамках поиска новых составов МЗ, реализован альтернативный подход, заключающийся в использовании в структуре МЗ только слабо поглощающих материалов, что позволяет увеличить глубину экстинкции и, следовательно, повысить спектральную селективность. Представлен новый состав Be/Al, оптимизированный для отражения излучения с длиной волны в области 17,1 нм и 30,4 нм. Экспериментальный коэффициент отражения такого зеркала оказался далек от своего теоретического значения из-за большой шероховатости на границах слоев [1]. Решение данной проблемы заключается в использовании дополнительных буферных слоев для уменьшения переходных границ в структуре. В качестве

материала такого слоя в работе был выбран кремний. В таблице 1 приведены исследуемые структуры с их экспериментальными и теоретическими коэффициентами отражения, частично взятые из [1], отдельно выделен рекордный результат $R=62,5\%$ [A8], полученный в данной диссертационной работе.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные отражательные характеристики МЗ типа Be/Al с буферными слоями Si .

Зеркало	$R_{\text{теор}}$	$R_{\text{эсп}}$
Be/Al	76,3%	47%
$\text{Be}/\text{Al}/\text{Si}$	75,3%	51%
$\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}$	73,5%	62,5%
$\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}/\text{Si}$	73,7%	56%

Также изучен вопрос о временной стабильности отражательных свойств МЗ с рекордным коэффициентом отражения. Измерялись угловые и спектральные зависимости коэффициента отражения на синхротроне BESSY-II через полмесяца после синтеза структуры и через 15 месяцев. Идентичность измеренных кривых свидетельствовала о высокой временной стабильности МЗ $\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}$ даже при их хранении в комнатных условиях.

Аналогичные исследования были проведены для МЗ $\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}$, оптимизированного для отражения излучения с длиной волны 30,4 нм. Данная структура показала одно из лучших значений спектральной ширины ($\Delta\lambda=1$ нм), удовлетворяющей требованиям, приведенным в первой главе ($\Delta\lambda<1,2$ нм) для $\lambda=30,4$ нм. Толщины материалов в зеркале при этом были больше (период МЗ $d=16,7$ нм, толщина Al $d_{\text{Al}}=8,7$ нм), чем в случае структуры, оптимизированной на 17,1 нм ($d=8,6$ нм, $d_{\text{Al}}=4$ нм). При этом эффект сглаживания границ при использовании Si также наблюдался. На рис. 3 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения для МЗ Be/Al и $\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}$. Исследование временной стабильности коэффициента отражения в данном случае показало, что за 20 месяцев хранения на воздухе коэффициент отражения изменился не более чем на 2%, что указывает на высокую временную стабильность $\text{Be}/\text{Si}/\text{Al}$ МЗ.

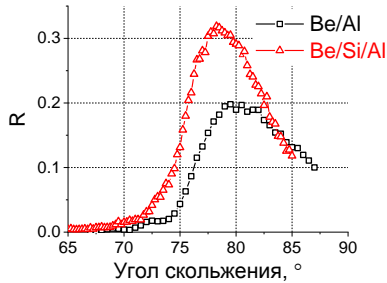


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициентов отражения для МЗ Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на скользящий угол падения 80° . Измерения проводились на длине волны 30,4 нм.

Для изучения Li-плазмы в данной диссертационной работе разработаны и синтезированы зеркала на основе Be/Al, оптимизированные на длину волны 26 нм при угле скольжения излучения $33,5^\circ$. Период и толщина алюминия в таких структурах: $d=29$ нм; $d_{Al}=15,7$ нм. В данном случае также применялся метод барьерного Si слоя, толщина которого составила 2 нм. На рис. 4 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения для структур Be/Al, Be/Si/Al, Be/Al/Si, Be/Si/Al/Si, полученные на синхротроне BESSY-II. Показано, что эффект наблюдается и для многослойных зеркал Be/Si/Al с периодами 29 нм. Оценка временной стабильности коэффициента отражения в данном случае проводилась как с использованием лабораторного рефлектометра ($\lambda=0,154$ нм) по измерениям через 16 месяцев и почти через 2 года после напыления, так и синхротронного ($\lambda=26$ нм) – через полмесяца и 20 месяцев. Изменения в коэффициенте отражения составили менее 1%, что свидетельствует о высокой временной стабильности МЗ с данными толщинами периода и алюминиевого слоя.

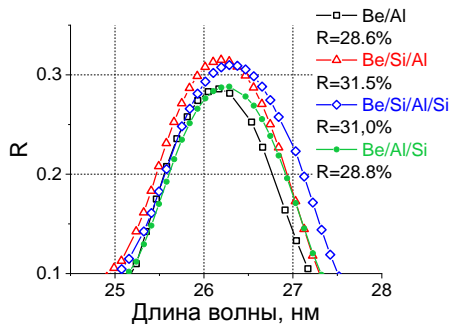


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал типа Be/Al с прослойками и без. Угол скольжения $33,5^\circ$.

Из полученных результатов следует, что использование кремниевого буферного слоя на границе между Ве и Al уменьшает шероховатость в структуре вплоть до толщин Al порядка 16 нм. Предполагается, что Si аморфизует переход между двумя основными материалами МЗ, тем самым мешая одному металлу наследовать кристаллическую структуру другого.

Также в данной главе представлены результаты по изучению свойств МЗ Ве/Mg, оптимизированных на длину волны 30,4 нм. Особое внимание уделено временной стабильности отражательных характеристик. Данное МЗ при использовании верхнего защитного слоя из алюминия толщиной 13 нм обеспечивает рекордные коэффициенты отражения, до 56%, достаточную для подавления близлежащих «паразитных» линий спектра спектральную ширину отражения $\Delta\lambda=1,6$ нм ($\lambda/\Delta\lambda\approx 20$) и высокую временную стабильность характеристик [A1]. На рис. 5 приведены снятые на оптической линии синхротрона BESSY-II спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ $[\text{Ве}/\text{Mg}]_{\times 60}/\text{Ве}/\text{Al}_{\text{ср}}$ для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия). Угол падения излучения 2° от нормали. Данные кривые сняты спустя 9 месяцев после напыления. Дальнейшие измерения временной стабильности показали, что за довольно продолжительный период времени (чуть более 3,5 лет) изменение коэффициента отражения составило менее 1%. Таким образом, предложенная новая пара материалов Ве/Mg для спектральной области 30 нм имеет большие перспективы для будущих миссий по изучению Солнца.

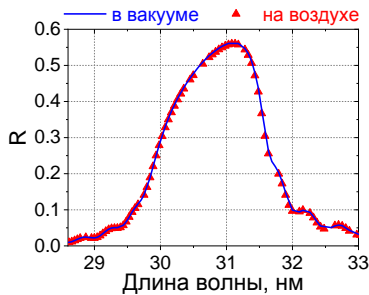


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ $[\text{Ве}/\text{Mg}]_{\times 60}/\text{Ве}_{6,5\text{нм}}/\text{Al}_{13\text{нм}}$ для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия).

Четвертая глава посвящена исследованию короткопериодных МЗ W/Ве, предназначенных для мягкого рентгеновского диапазона длин волн, а также МЗ Cr/Ве для жесткого диапазона. Предложенное в данной диссертационной работе МЗ W/Ве может эффективно перекрывать диапазон длин волн между узкими областями, в которых могут эффективно отражать МЗ Cr/V и Cr/Ti. На рис. 6 представлены теоретические расчеты коэффициентов отражения для идеальных зеркал

нормального падения Cr/V, Cr/Ti и W/Be. Очевидно, что, уступая в теоретическом пределе в коэффициенте отражения МЗ W/Be обладает гладкой зависимостью $R(\lambda)$ и потенциально может служить эффективной заменой традиционным МЗ.

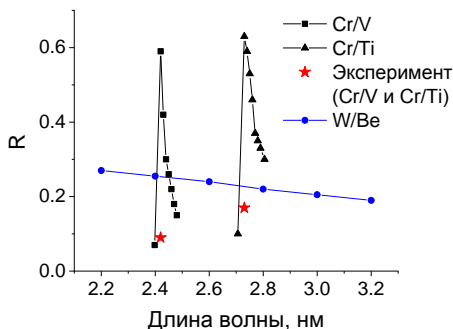


Рис. 6. Теоретически рассчитанные (линии с символами) и экспериментальные (звездочки) значения коэффициентов отражения некоторых многослойных зеркал в диапазоне «окна прозрачности воды».

В первом пункте 4 главы рассматривается многослойное зеркало W/Be, используемое в качестве одного из зеркал монохроматора [A4] (рабочий диапазон длин волн 0,67–3,14 нм). Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения для длин волн 0,154, 0,989, 1,759 и 3,14 нм приведены на рис. 7. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия на рис. 7(г) – измеренные значения. Экспериментальные кривые соответствуют расчетным при следующих структурных параметрах МЗ: период $d = 2,28$ нм, средние по структуре толщины слоев вольфрама $d_w = 0,95$ нм и бериллия $d_{Be} = 1,33$ нм; толщины переходных слоев $\sigma_{Be-na-W} = 0,4$ нм и $\sigma_{W-na-Be} = 0,21$ нм. Важно отметить относительно невысокое значение межслоевых шероховатостей, что позволяет создать эффективное отражающее покрытие.

Дополнительно проводилось исследование микроструктуры Be слоев разной толщины в МЗ W/Be с применением метода комбинационного рассеяния [A20, A22, A23], аналогичное исследованию для МЗ Mo/Be, описанному в главе 2. В МЗ W/Be слой Be имеет аморфную структуру по крайней мере до толщины 1,5 нм. Наличие кристаллической фазы в аморфной матрице бериллия было зафиксировано начиная с толщины Be слоя 2 нм, при дальнейшем увеличении толщины доля этой фазы растет. Так как в исследованных МЗ W/Be толщина Be слоев составила $d_{Be}=1,33$ нм, то в данном случае структуру Be слоев можно считать аморфной.

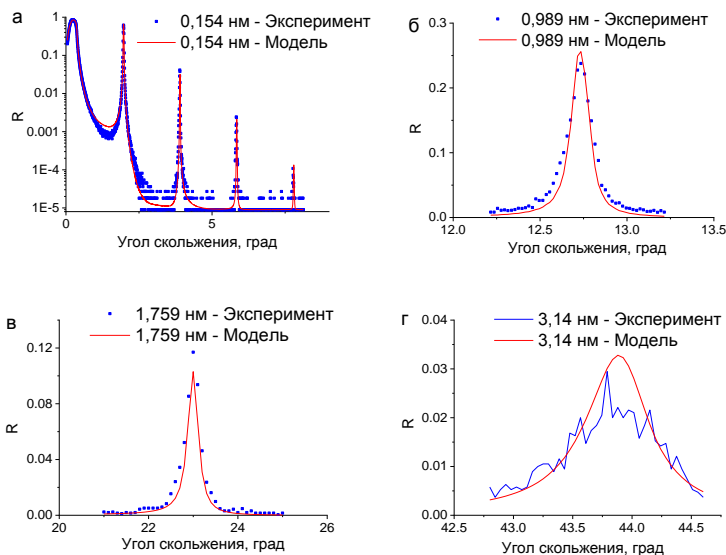


Рис. 7. Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения МЗ на основе W/Be для длин волн: а – 0,154; б – 0,989; в – 1,759; г – 3,14 нм. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия – эксперимент.

Во второй части 4 главы приведено исследование микроструктуры интерфейсов Сг/Ве многослойных зеркал методами рентгеновской рефлектометрии, диффузного рассеяния рентгеновского излучения и атомно-силовой микроскопии. Проведен синтез и сравнение между собой 8 образцов Сг/Ве многослойных зеркал с периодами от 2,26 до 0,8 нм. Данная структура интересна тем, что по расчету она превосходит традиционно используемую W/V₄C в разы по спектральной селективности при сопоставимых, либо превышающих значениях коэффициента отражения в диапазоне энергий фотонов 10–40 кэВ и при одинаковых величинах периода. Комбинация методов позволила разделить вклады шероховатости и межслоевой диффузии/перемешивания для каждого образца. Обнаружено, что в диапазоне толщин периодов 2,26–0,8 нм ширина переходных слоев и межслоевая шероховатость Сг/Ве зеркал не изменяются и остаются на уровне 3,3 и 2 Å, соответственно [А18]. Такое нетипичное поведение данных величин в зависимости от толщины пленок, когда не наблюдается потеря сплошности пленок, начиная с какой-то критической толщины, как в случае W/V₄C МЗ [21], может быть объяснено сильным химическим взаимодействием между слоями, что так же подтверждается данными рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [А16], на основе которых было показано, что при толщине периода больше 2 нм МЗ фактически состоит из

CrBe₁₂ со стороны границы Ве-на-Ст, и из CrBe₂ на границе Ст-на-Ве. Выделение шероховатости позволило также оценить взаимопроникновение материалов слоёв и обусловленное этим падение оптического контраста, составившее от 0,85 до 0,17 по сравнению с идеальной структурой с резкими границами. Полученные значения величин шероховатостей и переходных областей приведены на рис. 8.

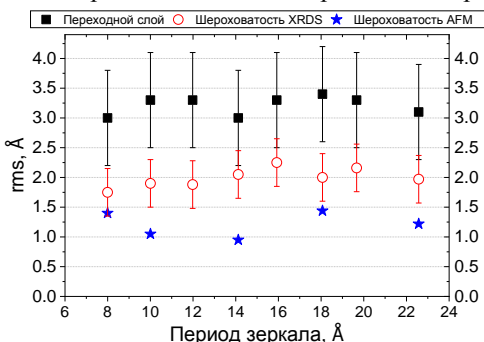


Рис. 8. Шероховатости и эффективные ширины интерфейсов в зависимости от периода структуры (rms – среднеквадратичное отклонение неровностей от средней поверхности).

С точки зрения рентгенооптических приложений, важнейшим результатом исследования стало определение численных значений протяженности переходного слоя и статистических свойств шероховатостей границ, позволяющие предсказать рентгенооптические характеристики Ст/Ве МЗ в широком диапазоне периодов и длин волн. Ст/Ве является перспективной системой для синхротронных приложений при решении задач, где требуется спектральная селективность $\Delta E/E < 1\%$.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

Основные результаты работы

К основным результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Осуществлен монтаж и запуск в работу технологической установки для изготовления многослойных рентгеновских зеркал методом магнетронного распыления. Установка позволяет наносить до 6-ти различных материалов в одном технологическом процессе без вскрытия на атмосферу. Разработаны методы защиты и регламенты работ, позволяющие напылять бериллийсодержащие многослойные зеркала. Определены оптимальные технологические параметры, позволяющие наносить высокоотражающие многослойные зеркала.

2. Изучено влияние тонких прослоек бериллия и карбида бора на границах на отражательные характеристики многослойных зеркал Мо/Si, оптимизированных

на длину волны 13,5 нм. Продемонстрирована возможность увеличения коэффициента отражения на 1,9% в абсолютном выражении (на 2,8% в относительном), и спектральной полосы отражения на 5,6%

3. Синтезированы и изучены структурные, рентгенооптические характеристики и временная стабильность Ве/Al многослойных зеркал, оптимизированных на диапазон длин волн 17,1–30,4 нм. На длине волны 17,1 нм на структуре Ве/Si/Al получен рекордный коэффициент отражения 62,5% и спектральная ширина 0,3 нм. Показан эффект сглаживания межслоевых границ с помощью Si прослоек в МЗ Ве/Al в диапазоне толщин Al 4–15 нм. Показана высокая временная стабильность этих структур.

На основе разработанных Ве/Si/Al МЗ были изготовлены комплекты зеркал для наноспутника CubeSat, рентгенофлуоресцентного анализа Li, монохроматора синхротрона ВЭПП-4 и спектрометра для диагностики плазмы.

4. Предложены, синтезированы и изучены структурные, рентгенооптические характеристики и временная стабильность Ве/Mg многослойных зеркал. Найден материал (Al) и определена оптимальная толщина (13 нм) защитного слоя и порядок следования слоев в Ве/Mg МЗ (Al наносится на Ве), обеспечивающие высокую временную стабильность отражательных характеристик. На длине волны 30,4 нм на структуре $[\text{Ве}/\text{Mg}]_{\times 60}/\text{Ве}/\text{Al}_{\text{суп}}$ получен рекордный коэффициент отражения 56%.

5. Синтезированы и изучены структурные и отражательные характеристики в диапазоне длин волн 0,154–3,14 нм W/Ве МЗ. Определены ширины переходных слоев, которые составили: $\sigma_{\text{Ве-на-В}} = 0,4$ нм и $\sigma_{\text{W-на-Ве}} = 0,21$ нм, и проведены расчеты отражательной способности W/Ве МЗ в спектральной области «окна прозрачности воды».

На основе W/Ве МЗ были изготовлены комплекты зеркал для двухзеркального монохроматора синхротрона ВЭПП-4.

6. Предложены, синтезированы и изучены структурные параметры короткопериодных Сг/Ве МЗ. Определены ширины переходных слоев, которые составили около 0,33 нм независимо от величины периода в диапазоне 0,8–2,2 нм. Выделен вклад шероховатости в ширину переходной области, который составил около 0,2 нм и который так же не зависит от периода. Эти эффекты объясняются формированием бериллидов, предотвращающих потерю сплошности пленок.

Проведена оценка перспектив использования Сг/Ве МЗ для синхротронных приложений для монохроматизации рентгеновских пучков.

Список публикаций автора

A1. Polkovnikov, V. N. Stable high-reflection Ве/Mg multilayer mirrors for solar astronomy at 30.4 nm / V. N. Polkovnikov, N. I. Chkhalo, R. S. Pleshkov, N. N. Salashchenko, F. Schäfers, M. G. Sertsu, A. Sokolov, M. V. Svechnikov, S. Yu. Zuev // Optics Letters. – 2019. – V.44. Iss.2. – P. 263–266.

A2. Зуев, С. Ю. Многослойные зеркала Мо/Si с барьерными слоями В4С и Ве / С. Ю. Зуев, Д. Е. Парьев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашченко, М.

В. Свечников, М. Г. Сертсу, А. Соколов, Н. И. Чхало, Ф. Шаферс // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 3. – С.5–9.

A3. Гарахин, С.А. Аперриодические зеркала на основе бериллиевых многослойных систем / С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 4. – С. 3–8.

A4. Ахсахалян, А. А. Комплект многослойных рентгеновских зеркал для двухзеркального монохроматора в диапазоне длин волн 0,41–15,5 нм / А. А. Ахсахалян, Ю. А. Вайнер, С. А. Гарахин, К. А. Елина, П. С. Заверткин, С. Ю. Зуев, Д. В. Ивлюшкин, А. Н. Нечай, А. Д. Николенко, Д. Е. Парьев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – №1. – С.14–20.

A5. Зуев, С. Ю. Влияние барьерных слоев бериллия на свойства многослойных зеркал Mo/Si / С. Ю. Зуев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало, F. Schäfers, M. G. Sertsu, A. Sokolov // Журнал технической физики. – 2019. – Т.89. Вып.11. – С. 1779–1782.

A6. Filatova, E. Angle resolved photoelectron spectroscopy as applied to X-ray mirrors: In depth study of Mo/Si multilayer systems / S. Sakhonenkov, E. Filatova, A. Gaisin, S. Kasatkov, A. Konashuk, R. Pleshkov, N. Chkhalo // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2019. – V. 21 – P. 25002–25010

A7. Вайнер, Ю. А. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Ю. А. Вайнер, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, А. Н. Нечай, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, М. В. Свечников, М. Г. Сертсу, Р. М. Смертин, А. Соколов, Н. И. Чхало, Ф. Шаферс // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 2. – С. 3–14.

A8. Плешков, Р. С. Сглаживающий эффект Si слоев в многослойных зеркалах Be/Al для спектрального диапазона 17–31 нм / Р. С. Плешков, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало, P. Jonnard // Журнал технической физики. – 2020. – Т.90. Вып.11. – С. 1870–1875.

A9. Garakhin, S. A. Modification and Polishing of the Holographic Diffraction Grating Grooves by a Neutralized Ar Ion Beam / S. A. Garakhin, M. V. Zorina, S. Yu. Zuev, M. S. Mikhailenko, A. E. Pestov, R. S. Pleshkov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo // Technical Physics. – 2020. – V.65. – P.1780–1785

A10. Filatova, E. Inhibition of chemical interaction of molybdenum and silicon in a Mo/Si multilayer structure by the formation of intermediate compounds / E. O. Filatova, S. S. Sakhonenkov, A. U. Gaisin, A. S. Konashuk, R. G. Chumakov, R. S. Pleshkov, N. I. Chkhalo // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2020. – V.23. – P. 1363–1370

A11. Svechnikov, M. Optical constants of sputtered beryllium thin films determined from photoabsorption measurements in the spectral range 20.4–250 eV / M. Svechnikov, N. Chkhalo, A. Lopatin, R. Pleshkov, V. Polkovnikov, N. Salashchenko, F. Schafers, M. G. Sertsu, A. Sokolov and N. Tsybin // Journal of Synchrotron Radiation. – 2020. – V.27. – P. 75–82

A12. Kumar, N. Microstructural Transformation of Nanoscale Be Layers in the Mo/Be and Be/Mo Periodic Multilayer Mirrors Investigated by Raman Spectroscopy / N. Kumar, R. S. Pleshkov, A. V. Nezhdanov, V. N. Polkovnikov, P. A. Yunin, N. I. Chkhalo, A. I. Mashin // J. Phys. Chem. C. – 2021. – V.125. – P. 2729–2738

A13. Chernyshev, A. Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements / A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R.

Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov // Precision Engineering. – 2021. – V.69. – P. 29–35

A14. Гарахин, С. А. Изготовление и исследование зеркал с широкой полосой пропускания для синхротронных применений / А. А. Ахсахалян, С. А. Гарахин, Ф. А. Дарьин, М. В. Зорина, В. В. Кривенцов, Д. Д. Першин, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Я. В. Ракшун, Н. Н. Салашенко, С. С. Светохин, М. В. Свечников, Д. С. Сороколетов, В. А. Чернов, Н. И. Чхало // Журнал технической физики. – 2021. – Т.91. Вып.10. – С. 1524–1531.

A15. Гарахин, С. А. Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6,6–32 нм мишени из нержавеющей стали при импульсном лазерном возбуждении / С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. Е. Пестов, А. А. Перекалов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, Р. М. Смертин, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало // Журнал технической физики. – 2021. – Т.91. Вып.10. – С. 1448–1453.

A16. Filatova, E. O. Layer intermixing in ultrathin Cr/Be layered system and impact of barrier layers on interface region / S. Sakhonenkov, E. Filatova, S. Kasatikov, E. Fateeva, R. Pleshkov, V. Polkovnikov // Appl. Surf. Sci. – 2021. – V. 570. – P. 1–13

A17. Giglia, A. Periodic multilayer for x-ray spectroscopy in the Li K range / V. Polkonikov, N. Chkhalo, R. Pleshkov, A. Giglia, N. Rividi, E. Brackx, K. Le Guen, I. Ismail, P. Jonnard // Applied Sciences. – 2021. – V.11(14). – P.6385

A18. Svechnikov, M. Intrinsic roughness and interfaces of Cr/Be multilayers / R. Pleshkov, N. Chkhalo, V. Polkovnikov, M. Svechnikov, M. Zorina // J. Appl. Crystallogr. – 2021. – V.54(6). – P.1747–1756

A19. Filatova, E. Effect of annealing on the interface formation in Mo/Be multilayer structures without/with barrier layer / A. Gaisin, A. Karataev, A. Solomonov, R. Pleshkov, N. Chkhalo, E. Filatova // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2021. – V. 23. Iss.41. – P. 23978–23985

A20. Kumar, N. Phase analysis of tungsten and phonon behavior of beryllium layers in W/Be periodic multilayers / N. Kumar, R. S. Pleshkov, A. V. Nezhdanov, P. A. Yunin, V. N. Polkovnikov, N. I. Chkhalo, A. I. Mashin // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2021. – V. 23. – P. 23303

A21. Водопьянов, А. В. Измерения абсолютных интенсивностей спектральных линий ионов Кг, Аг и О в диапазоне длин волн 10–18 нм при импульсном лазерном возбуждении / А. В. Водопьянов, С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. Е. Пестов, А. А. Перекалов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Н. И. Чхало // Квантовая электроника. – 2021. – Т.51. Вып.8. – С. 700–707.

A22. Kumar, N. Investigation of microstructure and reflectivity of thermally annealed Mo/Be and W/Be multilayer mirrors / R. S. Pleshkov, S. A. Garakhin, A. V. Nezhdanov, P. A. Yunin, V. N Polkovnikov, N. I Chkhalo // Surfaces and Interfaces – 2022. – V.28. – P. 101656

A23. Kumar, N. Raman scattering studies of the ambient atmospheric thermal stability of Be in periodic Be/Mo and Be/W multilayer mirrors / N. Kumar, G. D. Antisheva, A. V. Nezhdanov, M. N. Drozdov, R. S. Pleshkov, P. A. Yunin, V. N. Polkovnikov, N. I. Chkhalo // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2022. – V.55. – P. 245301

Список литературы

1. Chkhalo, N. I. Be/Al-based multilayer mirrors with improved reflection and spectral selectivity for solar astronomy above 17 nm wavelength / N. I. Chkhalo, D. E.

- Pariev, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, R. A. Shaposhnikov, I. L. Stroulea, M. V. Svechnikov, Yu. A. Vainer, S. Yu. Zuev // *Thin Solid Films*. – 2017. – V.631. – P. 106–111.
2. Bibishkin, M.S. Laboratory methods for investigations of multilayer mirrors in extreme ultraviolet and soft x-ray region / M. S. Bibishkin, D. P. Chekhonadskih, N. I. Chkhalo, E. B. Kluyenkov, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, L. A. Shmaenok, I. G. Zabrodin, S. Y. Zuev // *Proc. SPIE* / eds. K. A. Valiev, A. A. Orlikovsky. – 2004. – V. 5401. – P. 8–15.
 3. Зуев, С. Ю. Измерение характеристик оптических элементов рентгеновских телескопов / С. Ю. Зуев, А.В. Митрофанов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2002. – №1. – С.81–83.
 4. Гарахин, С. А. Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 5–50 нм: описание и результаты тестирования / С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, И. А. Каськов, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашченко, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало, М. В. Свечников // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47. – №. 4. – С. 385–392.
 5. Schäfers, F. The at-wavelength metrology facility for UV-and XUV-reflection and diffraction optics at BESSY-II / F. Schäfers, P. Bischoff, F. Eggenstein, A. Erko, A. Gaupp, S. Künstner, M. Mast, J. S. Schmidt, F. Senf, F. Siewert, A. Sokolov, T. Zeschke // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2016. – V. 23. – №. 1. – P. 67–77.
 6. Svechnikov, M. Multifitting: software for the reflectometric reconstruction of multilayer nanofilms / M. Svechnikov // *Journal of Applied Crystallography*. – 2020. – V. 53. – №. 1. – P. 244–252.
 7. Chen, Y. Transient small-scale brightenings in the quiet solar corona: A model for campfires observed with Solar Orbiter / Y. Chen, D. Przybylski, H. Peter, H. Tian, F. Auchère, D. Berghmans // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – V. 656. – P. L7.
 8. Веселовский, И. С. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия / И.С. Веселовский, М. И. Панасюк, С. И. Авдюшин и др. // *Космические исследования*. – 2004. – Т. 42. – №. 5. – С. 453–508.
 9. Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://thesis.xras.ru/sun_vocabulary.html.
 10. CubeSat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cubesat.org>.
 11. Mason, J. P. SunCET: The Sun Coronal Ejection Tracker Concept / J.P. Mason, Ph. C. Chamberlin, D. Seaton et al. // *J. Space Weather Space Clim*. – 2021. – V. 11. – P. 20.
 12. Kuzin, S. V. EUV observations of the solar corona with superhigh spatial resolution in the ARCA project / S. V. Kuzin, S. A. Bogachev, A. A. Pertsov, S. V. Shestov, A. A. Reva, A. S. Ulyanov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2011. – V. 75. – №. 1. – P. 87–90.
 13. Shestov, S. V. Complex of instrumentation KORTES for the EUV and x-ray imaging and spectroscopy of the solar corona / S. V. Shestov, A. S. Ulyanov, E. A.

- Vishnyakov, A. A. Pertsov, S. V. Kuzin // *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*. – SPIE, 2014. – V. 9144. – P. 1056–1063.
14. Jonkers, J. High power extreme ultra-violet (EUV) light sources for future lithography / J. Jonkers // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2006. – V. 15. – №. 2. – P. S8.
 15. Yakshin, A. E. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition / A. E. Yakshin, R. W. E. van de Kruijs, I. Nedelcu, E. Zoethout, E. Louis, F. Bijkerk, H. Enkisch, S. Müllender // *Emerging Lithographic Technologies XI*. – SPIE, 2007. – V. 6517. – P. 158–166.
 16. Chkhalo, N. I. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography / N. I. Chkhalo, S. A. Gusev, A. N. Nechay et al. // *Optics Letters*. – 2017. – V. 42. – №. 24. – P. 5070–5073.
 17. Ghafoor, N. Interface engineered ultrashort period Cr-Ti multilayers as high reflectance mirrors and polarizers for soft x rays of $\lambda = 2.74$ nm wavelength / N. Ghafoor, Per O. Å. Persson, J. Birch, F. Eriksson, F. Schäfers // *Applied Optics*. – 2006. – V. 45. – №. 1. – P. 137–143.
 18. Huang, Q. High reflectance Cr/V multilayer with B₄C barrier layer for water window wavelength region / Q. Huang, J. Fei, Y. Liu et al. // *Optics Letters*. – 2016. – V. 41. – №. 4. – P. 701–704.
 19. Windt, D. L. Growth, structure, and performance of depth-graded W/Si multilayers for hard x-ray optics / D. L. Windt, F. E. Christensen, W. W. Craig, C. Hailey, F. A. Harrison, M. Jimenez-Garate, R. Kalyanaraman, P. H. Mao // *Journal of applied physics*. – 2000. – V. 88. – №. 1. – P. 460–470.
 20. 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 Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2005. – V. 543. – №. 1. – P. 333–339.
 21. Vainer, Y. A. Analysis of cross-correlation of interface roughness in multilayer structures with ultrashort periods / Yu. A. Vainer, A. E. Pestov, K. A. Prokhorov, N. N. Salashchenko, A. A. Fraerman, V. V. Chernov, N. I. Chkhalo // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2006. – V. 103. – №. 3. – P. 346–353.
 22. Rashchenko, S. V. Generation and use of coherent X-ray beams at future SKIF storage ring / S. V. Rashchenko, M. A. Skamarokha, G. N. Baranov, Y. V. Zubavichus, I. V. Rakshun // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2020. – V. 2299. – №. 1. – P. 060001.

Подписано к печати 15.12.2022 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской академии наук — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино,
ул. Академическая, д. 7.