

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы (диссертации)

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

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Научная специальность: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Выполнил аспирант: Плешков Роман Сергеевич

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук:

Чхало Николай Иванович

дата: \_\_\_\_ июня 2022 г.

Нижний Новгород - 2022 г.

## Актуальность темы исследования

Интерес к многослойным рентгеновским зеркалам обусловлен использованием их в качестве дисперсионных элементов для рентгеновской спектроскопии, микроскопии, литографии, элементного флуоресцентного анализа, диагностики высокотемпературной плазмы, для коллимации, фокусировки рентгеновского излучения и для других применений. Особый интерес представляет многослойная оптика нормального падения, обеспечивающая нанометровое пространственное разрешение и применяемая для изучения короны Солнца, микроскопии и литографии. Развитие многослойной оптики мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового спектральных диапазонов подразумевает непрерывное улучшение рентгенооптических свойств: 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 характеристик практически во всем диапазоне экстремального ультрафиолетового излучения. В качестве возможных методик по улучшению оптических характеристик многослойных зеркал могут выступать: применение барьерных слоев, ионная полировка пленок, ионное ассистирование, дающие приращение коэффициента отражения на единицы процента. Получение многослойных структур качественно иного уровня, со значительно улучшенными рентгенооптическими характеристиками может дать использование новых пар элементов.

В данной научно-исследовательской работе исследуются возможности использования бериллиевых слоев для улучшения параметров многослойных зеркал. Возможность проведения систематических исследований с бериллием обусловлена появившейся в 2014 г. в ИФМ 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. В конце 1990-х работы с бериллием в многослойной оптике прекратились. Сыграла роль его заменяемость в мягкой рентгеновской области, выбор литографии в пользу длины волны 13,5 нм, где эффективны зеркала Mo/Si. Во-вторых, в довольно свежей работе [1] и теоретически, и экспериментально было показано, что в области длин волн  $\lambda > 17$  нм этот материал лучше использовать в качестве «рассеивающего» материала в пару к таким материалам, как Al и Mg. Благодаря достаточно высокой рассеивающей способности и низкому поглощению в этой работе

удалось получить и рекордно высокие коэффициенты отражения, и спектральную селективность. В-третьих, за последние годы технология «инженерии интерфейсов» развилась очень сильно, и ранние результаты с бериллийсодержащими многослойными зеркалами для рентгеновского диапазона также могли быть существенно улучшены.

Поэтому исследование бериллийсодержащих многослойных зеркал и применение к этим зеркалам современных технологий управления интерфейсами и оксидизацией верхних слоев является крайне актуальной задачей для дальнейшего развития многослойной рентгеновской оптики.

### **Цель и задачи научно-квалификационной работы**

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

Для достижения целей работы решались следующие задачи:

1. Разработка методики роста и изучение внутренней микроструктуры и оптических свойств многослойных зеркал Mo/Si с барьерными слоями Be и B<sub>4</sub>C, 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 методики роста и изучение микроструктуры и отражательных свойств Be-содержащих многослойных зеркал для спектральной области 17–40 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 Be-содержащих многослойных зеркал для мягкого и жесткого рентгеновского диапазонов длин волн. Определение возможности создания высокоотражающих многослойных покрытий с экстремально малой величиной периода.

### **Научная новизна**

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

2. Впервые предложены, синтезированы и исследованы многослойные зеркала Be/Mg с защитным верхним слоем Al, предназначенные для работы в диапазоне длин волн больших 25-40 нм. Показано, что структура [Be/Mg]/Alcap обладает относительно 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 абсолютной величины коэффициента отражения на 1,9%.

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 среднеквадратичная шероховатость не изменяется и остается на уровне 0,2 нм.

### **Научная и практическая значимость**

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 так же дисперсионные элементы для флуоресцентного анализа в ультрамягком рентгеновском диапазоне.

2. Демонстрация возможности увеличения коэффициента отражения Mo/Si многослойных зеркал почти на 2% за счет использования антидиффузионных слоев Be и B<sub>4</sub>C позволит увеличить эффективность 11-ти зеркально рентгенооптической схемы литографических установках на длине волны 13,5 нм почти в 1,5 раза.

3. Возможность достижения ультракоротких, 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/B<sub>4</sub>C, Al/Be, Al/Be/Si, Al/Si/Be/Si, Mg/Be, Mg/Be/Alcap, 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 дифракции и рефлектометрии в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн. Измерения методом малоугловой рентгеновской дифракции проводили в диапазоне углов падения излучения на образец  $\theta=0^{\circ}-6^{\circ}$  с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalyticalX'PertPro ( $\lambda = 0,154$  нм). В лаборатории измерения в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн проводились на: 1) рефлектометре с двумя монохроматорами (PCM-500 и LNT-30), которые соединены с одной камерой гониометра [2]; 2) рефлектометре со спектрометром Черни-Тюрнера и широкополосным лазерно-плазменным источником позволяет проводить измерения в диапазоне 5–50 нм [3]. Эти измерения дублировались синхротронными, выполненными на оптической линии синхротрона BESSY-II [4].

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 [5].

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

Основные положения, выносимые на защиту формулируются следующим образом:

1. Многослойная структура Be/Si/Al обладает рекордными коэффициентом отражения и величиной спектральной селективности на длинах волн больше 17,1 нм. Прослойки кремния увеличивают оптический контраст на границах.

2. Многослойная структура [Be/Mg]/Alcap обладает стабильными во времени отражательными характеристиками и обеспечивает рекордный коэффициент отражения в окрестности длины волны 30,4 нм.

3. Барьерные слои бериллия и карбида бора позволяют увеличить на 1,9% коэффициент отражения и на 5% полосу отражения многослойных Mo/Si зеркал на длине волны  $\lambda=13,5$  нм.

4. Многослойные зеркала Cr/Be сохраняют структурное совершенство вплоть до величины периода 0,8 нм. При этом длина межслоевой области составляет около 0,33 нм, шероховатость на уровне 0,2 нм и остается на том же уровне при изменении периода зеркала с 2,2 нм до 0,8 нм.

### **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/Alcap и Mo/Be/Si/B<sub>4</sub>C 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.

### **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

нанoeлектроника», г. Нижний Новгород, 2018 г. и на конференции «Рентгеновская оптика – 2018», г. Черногоровка, 2018 г.

О влиянии антидиффузионных слоев Be на отражательные характеристики Mo/Si-зеркал сделан доклад на XXIII симпозиуме «Нанofизика и нанoeлектроника», 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/Alcap) для диапазона длин волн 17 – 45 нм докладывались на XXIV симпозиуме «Нанofизика и нанoeлектроника», 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 «Нанofизика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород, 2021 и 2022 гг., на объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черногоровка, 2021 г.

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 56 работ. Опубликовано 23 статьи в научных журналах [A1-A23] и 33 статьи в сборниках конференций и тезисов докладов [T1-T33].

## **Структура и объем научно-квалификационной работы**

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 115 страницах, содержит 31 рисунок и 8 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 многослойных зеркал. В первом пункте оказывается, как следует выбирать материалы для формирования структуры M3 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, обладает довольно гладкими дисперсионными зависимостями, что даёт возможность создавать высокоотражающие многослойные зеркала в довольно широком диапазоне рентгеновского 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 [6], так и прикладных исследований («космическая погода» [7]). Особое внимание в таких исследованиях уделяется вопросу о причинах сильного нагрева (до  $2 \cdot 10^6$  К [8]) солнечной короны, наиболее удаленной от ядра участка атмосферы Солнца. Наблюдения за короной в основном ведутся 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 [9, 10]. 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 [11, 12] 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 неспособны 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 [13]. В связи с чем 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% на 2%) и  $\Delta\lambda$  (например, с 0,5 нм на 0,04 нм) может привести к значительному повышению эффективности литографической установки (до 40% для

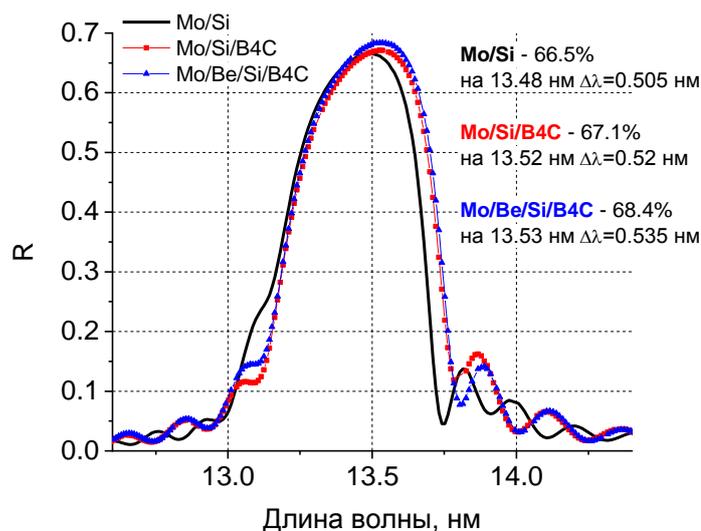
указанных значений). Основной парой материалов МЗ, максимально отражающего излучение с длиной волны 13,5 нм, являются Мо и Si. Наиболее действенным способом увеличения коэффициентов отражения многослойных зеркал Мо/Si признана методика барьерных слоев. В результате максимальный коэффициент отражения для структур типа Мо/B<sub>4</sub>C/Si/B<sub>4</sub>C и Мо/Si/C составил 70,15% ( $\Delta\lambda=0,52$  нм) на длине волны 13,5 нм [14]. В [15] для МЗ Мо/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 областях аномалий дисперсии оптических констант Ti ( $\lambda=2,74$  нм, МЗ Cr/Ti [16]) и V ( $\lambda=2,4$  нм, МЗ Cr/V [17]). Поэтому актуальной задачей является поиск такого сочетания материалов, которые позволили бы создать МЗ, эффективно отражающее на длинах волн, расположенных между такими аномальными 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/B<sub>4</sub>C [18, 19] наблюдается

резкое увеличение геометрической шероховатости, и, как следствие, падение коэффициента отражения. К примеру, у  $W/B_4C$  это происходит при уменьшении периода до 1,1–1,2 нм [20]. Для ряда задач в жестком рентгеновском диапазоне недостатком  $W/B_4C$  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 востребованной области в современных синхротронных исследованиях, например планируемых работах на синхротроне 4-го поколения СКИФ [21]. Поэтому поиск новых систем, обеспечивающих большие коэффициенты отражения и спектральную селективность при тех же, или даже меньших значениях периода, является крайне актуальным.

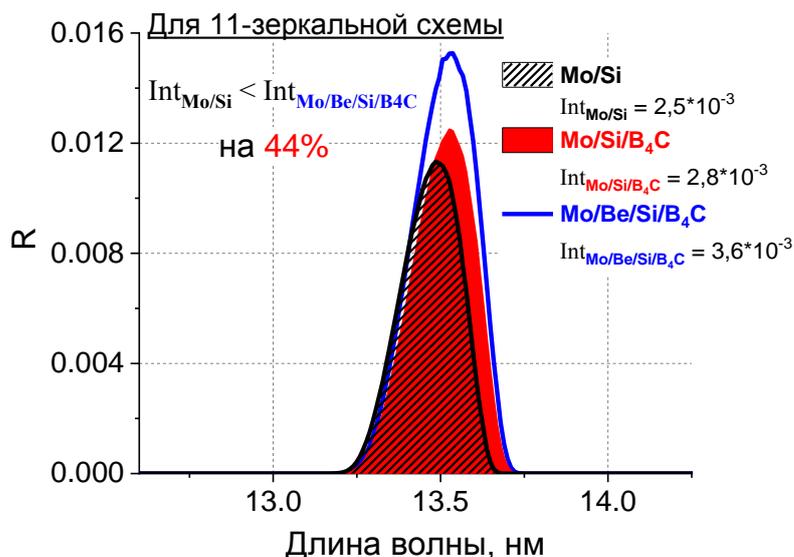
**Во второй главе,** в первом пункте, приводится информация об аппаратуре для синтеза бериллийсодержащих многослойных структур и методики измерения характеристик МЗ. Описывается 6-ти магнетронная установка: её составные части, особенности конструкции, режимы работы. В качестве методов аттестации МЗ приводятся малоугловая рентгеновская дифракция на длине волны 0,154 нм и рефлектометрия в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн. Описывается восстановление параметров исследуемых структур 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 [5].

Во втором пункте представлены результаты исследований многослойных зеркал  $Mo/Si$  с межслоевыми прослойками  $B_4C$  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 на 1,9% зеркало  $Mo/Si$  и на 1,3% зеркало  $Mo/Si/B_4C$  [A2, A5]. Также это зеркало обеспечивает наибольшую спектральную полосу пропускания на полувысоте ( $\Delta\lambda_{1/2}=0,535$  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<sub>4</sub>C и Mo/Be/Si/B<sub>4</sub>C. 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<sub>4</sub>C и Mo/Be/Si/B<sub>4</sub>C. Можно увидеть, что при переходе, например, от МЗ Mo/Si (R=66.5%; Δλ=0.505 нм) к Mo/Be/Si/B<sub>4</sub>C (R=68.4%; Δλ=0.535 нм) интегральный коэффициент отражения 11-зеркальной схемы увеличится на 44 %.



**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).

Несмотря на то, что продемонстрированные абсолютные значения коэффициентов отражения не являются рекордными, возможно получить коэффициент отражения более 70% на длине волны 13,5 нм, оптимизируя соотношение толщин материалов в элементарной ячейке многослойного зеркала, так как соотношение коэффициентов отражения структур всех трех типов всё равно должно сохраняться.

**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 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 работе.

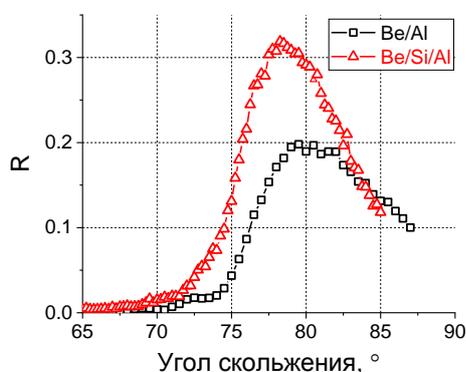
**Таблица 1.** Расчетные и экспериментальные отражательные характеристики МЗ типа Be/Al с буферными слоями Si.

Зеркало	$R_{\text{теор}}$	$R_{\text{эксп}}$
Be/Al	76,3%	47%
Be/Al/Si	75,3%	51%
<b>Be/Si/Al</b>	<b>73,5%</b>	<b>62,5%</b>
Be/Si/Al/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

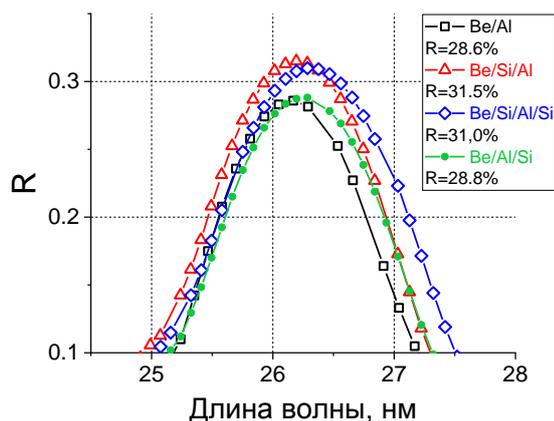
структуры и через 15 месяцев. Идентичность измеренных кривых свидетельствовала о высокой временной стабильности МЗ Be/Si/Al даже при их хранении в комнатных условиях.

Аналогичные исследования были проведены для МЗ Be/Si/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  $d_{Al}=8,7$  нм), чем в случае структуры, оптимизированной на 17,1 нм ( $d=7,6$  нм,  $d_{Al}=4$  нм). При этом эффект сглаживания границ при использовании Si также наблюдался. На рис. 3 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения для МЗ Be/Al и Be/Si/Al.



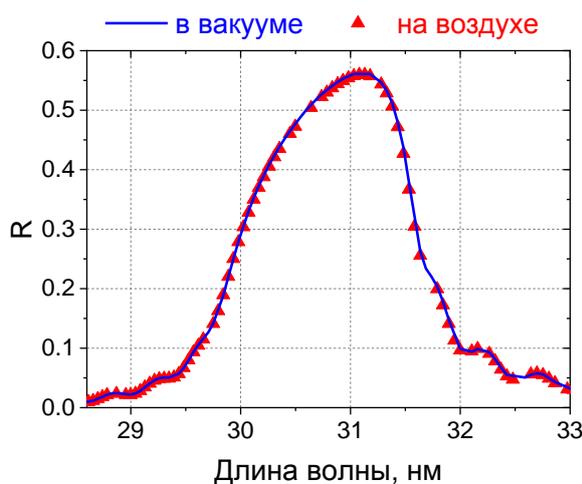
**Рис. 3.** Угловые зависимости коэффициентов отражения для МЗ Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на скользящий угол падения 80°. Измерения проводились на длине волны 30,4 нм.

Для изучения Li-плазмы в рамках данной работы разработаны и синтезированы зеркала на основе Be/Al, оптимизированные на длину волны 26 нм при угле скольжения излучения 33,5°. 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 изображены наложенные друг на друга спектральные зависимости коэффициента 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. Из результатов, полученных в данной работе, следует, что использование кремниевого буферного слоя на границе между Be 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.



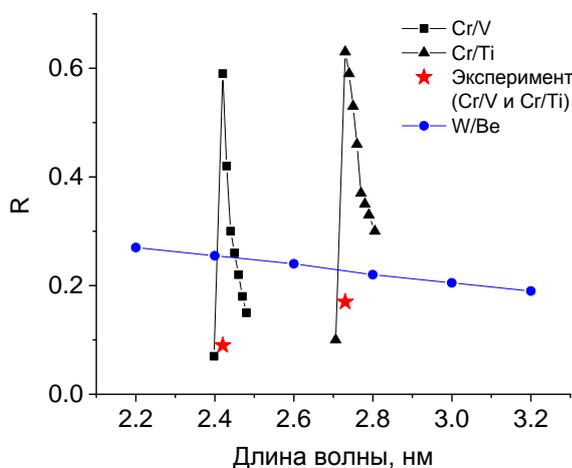
**Рис. 4.** Спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал типа Be/Al с прослойками и без. Угол скольжения  $33,5^\circ$ .

Также в данной главе представлены результаты по изучению свойств МЗ Be/Mg, оптимизированных на длину волны 30,4 нм. Особое внимание уделено временной стабильности отражательных характеристик. Данное МЗ при использовании верхнего защитного слоя из алюминия обеспечивает рекордные коэффициенты отражения, до 56%, 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-2 спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ  $[\text{Be/Mg}]_{\times 60}/\text{Be/Al}$  для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия). Угол падения излучения  $2^\circ$  от нормали. Данные кривые сняты спустя 9 месяцев после напыления.



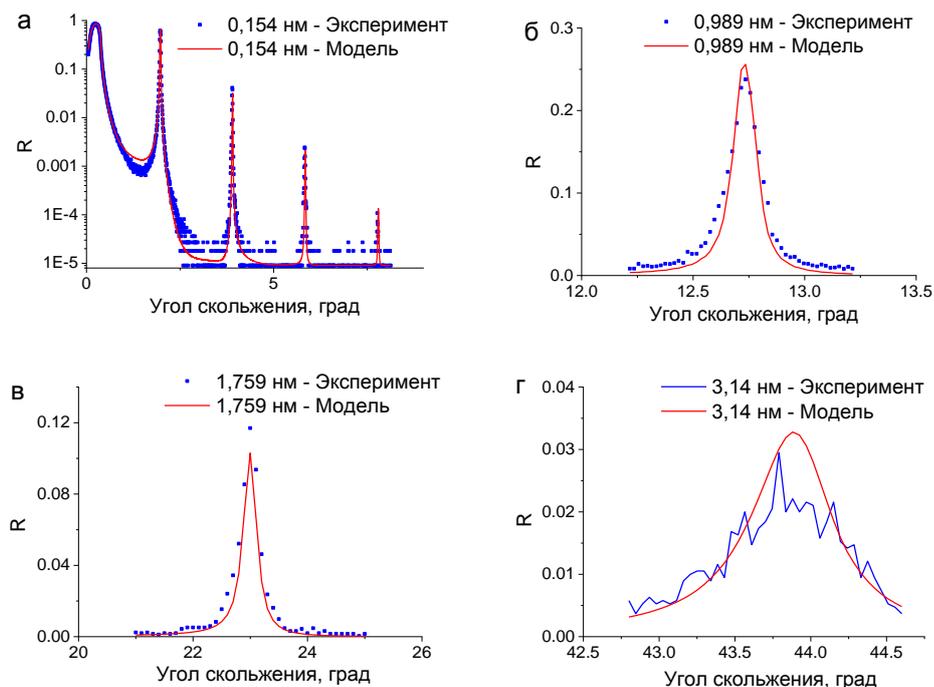
**Рис. 5.** Спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ  $[\text{Be/Mg}]_{\times 60}/\text{Be}_{6,5\text{нм}}/\text{Al}_{13\text{нм}}$  для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия).

**Четвертая глава** посвящена исследованию короткопериодных МЗ W/Be, предназначенных для мягкого рентгеновского диапазона длин волн, а также МЗ Cr/Be для жесткого диапазона. Предложенное в рамках данной работы МЗ W/Be может эффективно перекрывать область между областями эффективности МЗ Cr/V и Cr/Ti. На рис. 7 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. 7.** Теоретически рассчитанные (линии с символами) и экспериментальные (звездочки) значения коэффициентов отражения некоторых многослойных зеркал в диапазоне «окна прозрачности воды».

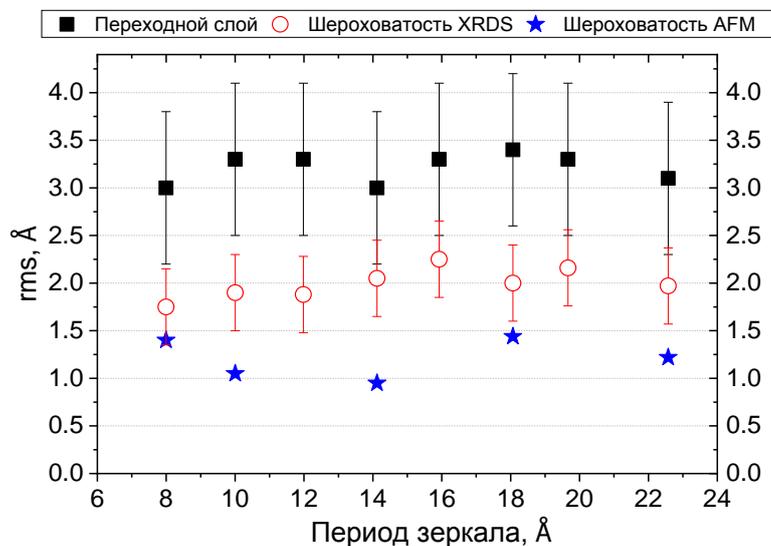
В данном пункте 4 главы рассматривается многослойное зеркало W/Be, используемое в качестве одного из зеркал монохроматора [A4] (рабочий диапазон длин волн 0,67–3,14 нм). Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения для длин волн 0,154, 0,989, 1,759 и 3,14 нм приведены на рис. 8. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия на рис. 4.2 (г) – измеренные значения. Экспериментальные кривые, за исключением длины волны 3,14 нм, 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  $\sigma(Be\text{-на-W}) = 0,4$  нм и  $\sigma(W\text{-на-Be}) = 0,21$  нм. Важно отметить относительно невысокое значение межслоевых шероховатостей.



**Рис. 8.** 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 Cr/Be многослойных зеркал методами рентгеновской рефлектометрии (XRR), диффузного рассеяния рентгеновского излучения (XRDS) и атомно-силовой микроскопии (AFM). Проведен синтез и сравнение между собой 8 образцов Cr/Be многослойных зеркал с периодами от 2,26 до 0,8 нм. Данная структура интересна тем, что по расчету она превосходит W/B<sub>4</sub>C 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 величина ростовой шероховатости Cr/Be зеркал не зависит от толщины периода и составляет 2 Å [A18]. Такое нетипичное поведение шероховатости в зависимости от толщины пленок, когда не наблюдается потеря сплошности пленок, начиная с какой-то критической толщины, как в случае W/B<sub>4</sub>C МЗ [20], может быть объяснено сильным химическим взаимодействием между слоями, что так же подтверждается данными рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [A16]. Выделение шероховатости позволило также оценить взаимопроникновение материалов слоёв и обусловленное этим падение оптического

контраста, составившее от 0,85 до 0,17 по сравнению с идеально резкой структурой. Полученные значения величин шероховатостей и переходных областей приведены на рис. 6.



**Рис. 6.** 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  $\text{Cr/Be}$  МЗ в широком диапазоне периодов и длин волн.  $\text{Cr/Be}$  является крайне перспективной системой для синхротронных приложений при решении задач, где требуется спектральная селективность  $\Delta E/E < 1\%$ .

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам работы, которые состоят в следующем.

1. Для работы в диапазоне длин волн 17–30 нм предложены и синтезированы многослойные зеркала на основе  $\text{Be/Al}$  и  $\text{Mg/Be}$ , обладающие рекордными коэффициентами отражения и величиной спектральной селективности. Данные многослойные зеркала обладают высокой временной стабильностью. На основе многослойной структуры  $\text{Be/Si/Al}$  изготовлены комплекты полетных многослойных зеркал для наноспутника CubeSat.

2. Изучено влияние антидиффузионных слоев бериллия и карбида бора на оптические свойства многослойных зеркал  $\text{Mo/Si}$ , оптимизированных на длину волны

$\lambda=13,5$  нм. Продемонстрирована возможность увеличения коэффициента отражения на 1,9 процента и полосы отражения на 5 процентов.

3. Впервые синтезированы и изучены W/Be и Cr/Be короткопериодные многослойные зеркала. Показано, что величина ростовой шероховатости Cr/Be зеркал не зависит от толщины периода, по крайней мере, до толщин 0,8 нм, и, в данном случае, составила 2 Å.

### Список публикаций автора

**A1.** Polkovnikov, V.N. Stablehigh-reflection Be/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 // *OpticsLetters*. – 2019. – V.44. Iss.2. – P. 263–266.

**A2.** Зуев, С.Ю. Многослойные зеркала Mo/Si с барьерными слоями В<sub>4</sub>С и Be / С.Ю.Зуев, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, 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. Аперидические 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. Ивлешкин, 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 Xray 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. Салащенко, 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. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало, Р. 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. Салащенко, 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. Салащенко, 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.Kasatkov, 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. Салащенко, 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

## Материалы конференций и тезисы докладов с участием автора

**Т1.** Ахсахалян, А.А. Комплект многослойных рентгеновских зеркал для двухзеркального монохроматора на диапазон длин волн 0,41–15,5 нм / А.А. Ахсахалян, Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, Л.А. Мазо, А.Н. Нечай, А.Д. Николенко, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы XXIII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С.397–398.

**Т2.** Вайнер, Ю.А. Многослойные зеркала на основе бериллия для спектральной области 17–35 нм / Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, М.Г. Сертсу, А. Соколов, Н.И. Чхало, Ф. Шаферс // Материалы XXII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 411–412.

**Т3.** Гарахин, С.А. Многослойные зеркала W/Be для мягкого рентгеновского диапазона длин волн / С.А. Гарахин, А.Н. Нечай, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы XXII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 464–465.

**Т4.** Вайнер, Ю.А. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев, Р.С. Плешков, Д.Е. Парьев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, М.Г. Сертсу, А. Соколов, Н.И. Чхало, Ф. Шаферс // Материалы XXII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 413–414.

**Т5.** Зорина, М.В. Возможность применения массивного бериллия в качестве материала подложек для космической астрономии ЭУФ диапазона длин волн / М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, А.В. Мильков, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, И.Л. Струля, Н.И. Чхало // Материалы XXII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 436–437.

**Т6.** Зуев, С.Ю. Характеризация абсорбционных фильтров ЭУФ излучения на основе пленок бериллия субмикронной толщины / С.Ю. Зуев, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Материалы XXII симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 438–439.

**Т7.** Гарахин, С.А. Многослойные зеркала W/Be для спектрального диапазона 0,7–3 нм / С.А. Гарахин, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В.

Свечников, Н.И. Чхало // Материалы конференции «Рентгеновская оптика - 2018», г. Черногоровка. – 2018. – С. 18–20.

**T8.** Polkovnikov, V.N. Multilayer mirrors based on beryllium for an extreme ultraviolet range / V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, R.S. Pleshkov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, M.V. Svechnikov, S.Yu. Zuev // *Physics of X-Ray and Neutron Multilayer Structures*, Palaiseau (France). – 2018. – P.24.

**T9.** Гарахин, С.А. Эффективность генерации характеристического излучения Вещей содержащих мишеней / С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашченко, Г.Д. Демин, Н.А. Дюжев, М.А. Махиборода // Материалы XXIII симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 445–446.

**T10.** Зуев, С.Ю. Увеличение дифракционной эффективности голографических решеток в МР и ЭУФ диапазоне / С.Ю. Зуев, Р.С. Плешков, М.В. Зорина, С.А. Гарахин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало // Материалы XXIII симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 477–478.

**T11.** Лопатин, А.Я. Характеристики рентгеновских трубок с автоэмиссионным кремниевым катодом и пленочным анодом «протрельного» типа / А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Н.Н. Салашченко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, Н.А. Дюжев, Г.Д. Демин, М.А. Махиборода // Материалы XXIII симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 489–490.

**T12.** Зуев, С.Ю. Влияние барьерных слоев бериллия на свойства многослойных зеркал Mo/Si / Р.С. Плешков, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, М.Г. Sertsu, А. Sokolov, Н.И. Чхало, F. Schafers // Материалы XXIII симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 505–506.

**T13.** Свечников, М.В. Диэлектрическая проницаемость бериллия в диапазоне длин волн 1–60 нм / М.В. Свечников, А.Я. Лопатин, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, F. Schafers, M.G. Sertsu, A. Sokolov // Материалы XXIII симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 521.

**T14.** Гайсин, А.У. Адаптация подхода восстановления толщин слоев на основе РФЭС к изучению протяженности и строения межслоевых областей многослойных рентгеновских зеркал / А.У. Гайсин, С.С. Сахоненков, С.А. Касатиков, А.С. Конашук, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Е.О. Филатова // Материалы XXIV симпозиума «Нанопластика и нанопластика», г. Нижний Новгород. – 2020. – С. 851–852.

**T15.** Плешков, Р.С. Узкополосные многослойные зеркала для спектрального диапазона 17–45 нм / Р.С. Плешков, С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы XXIV симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2020. – С. 895–896.

**T16.** Свечников, М.В. Эффективность резонансных многослойных мишеней в качестве источников ЭУФ излучения / М.В. Свечников, С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало // Материалы XXIV симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2020. – С. 909.

**T17.** Малышев, И.В. Тестирование характеристик микроскопа на длину волны 13,88 нм / И.В. Малышев, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Материалы XXIV симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2020. – С. 887–888.

**T18.** Гайсин, А.У. Ограничение химического взаимодействия молибдена и кремния в многослойной структуре Mo/Si путем образования промежуточных соединений / А.У. Гайсин, А.В. Сахоненков, А.С. Конашук, А.В. Каратаев, Р.Г. Чумаков, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Е.О. Филатова // Сборник тезисов VII молодежного научного форума с международным участием «Open Science 2020», г. Гатчина. – 2020. – С. 42.

**T19.** Каратаев, А.В. Влияние отжига на состав межфазовой границы в Mo/Be многослойной структуре / А.В. Каратаев, А.У. Гайсин, А.В. Соломонов, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Е.О. Филатова // Сборник тезисов VII молодежного научного форума с международным участием «OpenScience 2020», г. Гатчина. – 2020. – С.42.

**T20.** Нечай, А.Н. Спектрометр для исследования эмиссионных спектров лазерной плазмы в ЭУФ диапазоне с абсолютно калиброванным детектором /А.В. Водопьянов, С.А. Гарахин, С.Ю. Зув, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Н.Н. Салашенко, Р.М. Смертин, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало // Материалы XXV симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.379–380.

**T21.** Гайсин, А.У. Влияние барьерного слоя на формирование межслоевой области в многослойных рентгеновских зеркалах Mo/Si и Mo/Be / А.У. Гайсин, С.С. Сахоненков, С.А. Касатиков, А.С. Конашук, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Е.О. Филатова // Материалы XXV симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.381–382.

**T22.** Гарахин, С.А. Изготовление и исследование зеркал с широкой полосой пропускания в диапазоне 7–15 кэВ для синхротронных применений / С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Р.С. Плешков, А.Е. Пестов, М.В. Зорина, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников,

Н.И. Чхало, А.Д. Ахсахалян, В.А. Чернов, В.В. Кривенцов // Материалы XXV симпозиума «Нанопластика и наноплектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.383–384.

**T23.** Гарахин, С.А. Изготовление и исследование рентгеновских зеркал с широкой полосой пропускания в ИФМ РАН / С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Р.С. Плешков, А.Е. Пестов, М.В. Зорина, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы XXV симпозиума «Нанопластика и наноплектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.385–386.

**T24.** Каратаев, А.В. Влияние отжига на формирование межфазовой границы в многослойной структуре Мо/Ве / А.В. Каратаев, А.У. Гайсин, А.В. Соломонов, С.С. Сахоненков, А.С. Касатиков, А.С. Конашук, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, Е.О. Филатова // Материалы XXV симпозиума «Нанопластика и наноплектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.411–412.

**T25.** Малышев, И.В. Высокoапертурный зеркальный рентгеновский микроскоп на длину волны 13,88 нм / И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, Е.С. Антюшин, Д.С. Дмитриев, В.Н. Полковников, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, М.С. Михайленко, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, Н.Н. Салашенко // Материалы XXV симпозиума «Нанопластика и наноплектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.421–422.

**T26.** Плешков, Р.С. Разработка, синтез и изучение свойств Ве-содержащих многослойных зеркал для диапазонов жесткого и мягкого рентгеновского излучения / Р.С. Плешков, С.А. Гарахин, Н. Кумар, В.Н. Полковников, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы XXV симпозиума «Нанопластика и наноплектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.435–436.

**T27.** 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 // Материалы объединенной конференции «Электронно–лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черногoловка. – 2021. – С.289–290.

**T28.** Плешков, Р.С. Синтез и изучение свойств многослойных зеркал Сг/Ве для диапазона жесткого рентгеновского излучения / Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, М.В. Свечников, Н.И. Чхало // Материалы объединенной конференции «Электронно–лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черногoловка. – 2021. – С.296–298.

**Т29.** Гарахин, С. А. Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 3-32 нм мишени из углерода 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. Салащенко, Р.М. Смертин, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // Материалы XXVI симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С.531–532.

**Т30.** Малышев, И.В. Зеркальный ЭУФ-микроскоп на 13.9нм. Демонстрация разрешения и z-томографии / И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, Е.С. Антюшин, Д.С. Дмитриев, В.Н. Полковников, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, М.С. Михайленко, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, Н.Н. Салащенко // Материалы XXVI симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С.562–563.

**Т31.** Плешков, Р.С. Исследование микроструктуры границ раздела в многослойных зеркалах  $\text{Si}/\text{Be}$  и  $\text{W}/\text{Be}$  / Р. С. Плешков, С. А. Гарахин, Н. Кумар, В. Н. Полковников, С.С. Сахоненков, М. В. Свечников, Е. О. Филатова, Н. И. Чхало // Материалы XXVI симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С. 582–583.

**Т32.** Плешков, Р.С. Влияние барьерных слоев  $\text{Si}$  на границы раздела в многослойных зеркалах  $\text{Al}/\text{Be}$  / Р. С. Плешков, С. А. Гарахин, Н. Кумар, В. Н. Полковников, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Материалы XXVI симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С.584–585.

**Т33.** Торопов, М.Н. Изготовление и характеристика оптических элементов для солнечного телескопа ВУФ диапазона для наноспутников / М.Н. Торопов, Н.Ф. Ерхова, С.Ю. Зуев, С.В. Кузин, И.П. Лобода, А.Я. Лопатин, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Цыбин, А.К. Чернышов, Н.И. Чхало // Материалы XXVI симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С. 612–613.

## Список литературы

1. Chkhalo, N. I.  $\text{Be}/\text{Al}$ -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. 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.
3. 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. Салащенко, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало, М. В. Свечников // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 4. – С. 385–392.
4. 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.
5. Svechnikov, M. Multifitting: software for the reflectometric reconstruction of multilayer nanofilms / M. Svechnikov // Journal of Applied Crystallography. – 2020. – V. 53. – №. 1. – P. 244–252
6. 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.
7. 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.
8. Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://thesis.xras.ru/sun\\_vocabulary.html](https://thesis.xras.ru/sun_vocabulary.html).
9. CubeSat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cubesat.org>.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Huang, Q. High reflectance Cr/V multilayer with B<sub>4</sub>C barrier layer for water window wavelength region / Q. Huang, J. Fei, Y. Liu et al. // *Optics Letters*. – 2016. – V. 41. – №. 4. – P. 701–704.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.