

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

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

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
Чхало Николай Иванович

Нижний Новгород - 2022

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Многослойные зеркала для экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения (литературный обзор).....	11
1.1. Многослойные зеркала	11
1.1.1. Принцип действия многослойных зеркал.....	11
1.1.2. Основные отражательные характеристики. Выбор материалов.....	14
1.1.3. Свойства бериллия как элемента рентгеновской оптики	21
1.2. Многослойные зеркала для солнечной астрономии	23
1.2.1. Наблюдения солнечной короны в рентгеновском диапазоне	23
1.2.2. Свойства многослойных зеркал для солнечной астрономии	27
1.3. Многослойные зеркала для проекционной литографии с рабочей длиной волны 13,5 нм.....	35
1.4. Короткопериодные многослойные зеркала для мягкого и жесткого рентгеновского диапазона	39
1.4.1. Короткопериодные многослойные зеркала для мягкого рентгеновского диапазона	39
1.4.2. Многослойные зеркала для жесткого рентгеновского диапазона	41
1.5. Выводы по главе 1.....	43
Глава 2. Синтез и изучение Mo/Si зеркал с Be и В ₄ C барьерными слоями для области 13,5 нм.....	44
2.1. Аппаратура для синтеза бериллийсодержащих многослойных структур	44
2.2. Методы исследования структурных параметров и отражательных характеристик МЗ.....	48
2.3. Влияние барьерных слоев Be и В ₄ C на отражательные характеристики Mo/Si.....	62
2.4. Основные результаты главы 2	70
Глава 3. Многослойные зеркала на основе бериллия для спектральной области 17–30 нм.	72
3.1. Многослойные зеркала Be/Al с буферными слоями Si.....	72
3.2. Многослойные зеркала Be/Mg для спектральной области вблизи 30,4 нм	84
3.3. Основные результаты главы 3	90
Глава 4. Короткопериодные многослойные рентгеновские зеркала для мягкого и жесткого рентгеновских диапазонов.	91
4.1. Короткопериодные многослойные зеркала W/Be для диапазона длин волн 0,67–3,14 нм.....	91
4.2. Короткопериодные многослойные зеркала Cr/Be.....	96
4.3. Основные результаты главы 4	113
Основные результаты	114
Литература	116
Список публикаций автора.....	129

Введение

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, временных характеристик отраженных импульсов электромагнитного излучения 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 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 с улучшенными рентгенооптическими характеристиками может дать использование новых материалов.

В данной диссертационной работе исследуются возможности использования бериллия для улучшения параметров многослойных зеркал. Возможность проведения систематических исследований с бериллием обусловлена появившейся в 2016 г. в институте 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 Ве К и Si L, его применение не дает каких-либо качественных улучшений отражательных характеристик многослойных зеркал. С учетом ужесточения современных санитарных норм, работы по напылению этого материала практически остановились по всему миру. Однако в ранних работах был изучен крайне ограниченный набор 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 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 бериллия в этой работе удалось получить рекордные значения коэффициентов отражения и спектральных селективностей.

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 диссертационной работы

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

Задачи диссертационной работы

Для достижения целей 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 Be-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 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 работы

1. Впервые синтезированы и исследованы многослойные зеркала на основе Be/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 Be/Mg с защитным верхним слоем Al, предназначенные для работы в диапазоне длин волн 25–40 нм. Показано, что структура [Be/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 В₄C 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 ультракоротких, менее 1 нм, периодов Cr/Be многослойных зеркал указывает на большие перспективы этой многослойной системы в синхротронных и спектроскопических исследованиях.

Основные положения, выносимые на защиту

Основные положения, выносимые на защиту, формулируются следующим образом:

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.

Публикации по теме

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 55 работ. Опубликовано 23 статьи в научных журналах [A1-A23] и 32 статьи в сборниках конференций и тезисов докладов [T1-T32].

Личное участие 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_{кар} 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.

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 «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2018 г. и на конференции «Рентгеновская оптика – 2018», г. Черногловка, 2018 г.

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

Результаты работы по изучению влияния аморфизирующих промежуточных слоев и защитного покрытия на отражательные характеристики и временной стабильности Be-содержащих многослойных зеркал (Be/Si/Al, Be/Mg/Al_{cap}) для диапазона длин волн 17–45 нм докладывались на XXIV симпозиуме «Нанопизика 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 «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2021 и 2022 гг., на объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике», г. Черногловка, 2021 г.

Структура и объем диссертации

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

Содержание работы по главам

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. 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 его преимущество относительно других материалов, используемых в настоящее время в рассматриваемой спектральной области.

Во второй главе приводятся результаты исследований многослойных зеркал Mo/Si с межслоевыми прослойками В₄С и Ве в окрестности длины волны 13,5 нм. Показано, что четырехкомпонентное многослойное зеркало типа Mo/Be/Si/В₄С по коэффициенту отражения превосходит на относительные 2,8% зеркало Mo/Si и на 1,9% зеркало Mo/Si/В₄С. Также это зеркало обеспечивает наибольшую спектральную полосу пропускания на полувысоте ($\Delta\lambda_{1/2}=0,54$ нм). Дается объяснение этим эффектам.

В третьей главе представлены результаты исследования сглаживающего эффекта тонких пленок Si, примененных в качестве буферных слоев в многослойных зеркалах Ве/Al, оптимизированных для работы на длинах волн больше 17,1 нм. Исследованы многослойные зеркала околонормального (угол скольжения 88°) и скользящего падения (угол скольжения 33,5°). Показано, что эффект наблюдается для многослойных зеркал Ве/Si/Al с периодами, по крайней мере, до 29 нм. Для зеркал нормального падения, оптимизированных на длину волны 17,14 нм, получен рекордный пиковый коэффициент отражения 62,5% при спектральной селективности $\lambda/\Delta\lambda=59$. Исследована временная стабильность данных зеркал.

Также представлены результаты по изучению свойств МЗ Ве/Mg, оптимизированных на длину волны 30,4 нм. Особое внимание уделено временной стабильности отражательных характеристик. Пара материалов Ве/Mg является новой и представляет интерес как многослойное покрытие для работы с He II ($\lambda=30,4$ нм) – одной из основных эмиссионных линий, используемых в исследованиях короны Солнца. 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.

Четвертая глава посвящена исследованию микроструктуры интерфейсов Cr/Ве многослойных зеркал методами рентгеновской рефлектометрии, диффузного рассеяния рентгеновского излучения и атомно-силовой микроскопии. Cr/Ве структура интересна тем, что по расчету она превосходит 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 в длину переходных областей. Обнаружено, что в диапазоне толщин периодов 2,26–0,8 нм величина ростовой шероховатости Cr/Ве зеркал не зависит от толщины периода и составляет 2 Å. 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.

Также рассматривается МЗ W/Ве, способное эффективно отражать излучение в «проблемной» области мягкого рентгеновского диапазона 2–4 нм («окно прозрачности воды»), в которой высоких коэффициентов отражения удавалось добиваться только вблизи краев поглощения таких химических элементов, как V, Ti и Sc.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

Глава 1. Многослойные зеркала для экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения (литературный обзор)

1.1. Многослойные зеркала

1.1.1. Принцип действия многослойных зеркал

Специфика взаимодействия рентгеновского излучения с веществом заключается в том, что длина волны в данном случае сравнима с межатомными расстояниями. Также оптическая плотность всех веществ в этой области оказывается меньше 1 и мало от нее отличается. Выражение для диэлектрической проницаемости ε записывается в виде:

$$\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma, \quad (1.1)$$

где δ и γ – величины, описывающие поляризуемость и поглощение среды. Как правило, выполняются следующие неравенства: $0 < \delta < 1$, $\gamma < 1$, $\gamma < \delta$. При этом с уменьшением длины волны (менее 5 нм) значения этих величин быстро падают и можно считать, что $\gamma < \delta \ll 1$.

Существовавшая до создания в 1970–1980-х годах многослойных зеркал рентгеновская оптика скользящего падения [2] могла обеспечивать отличное от нуля отражение только в области полного внешнего отражения (ПВО). Вне области ПВО отражение для всех материалов становится пренебрежимо мало, что связано с малой поляризуемостью (δ) любого вещества в рентгеновском диапазоне. В этом можно убедиться, проведя некоторые оценки для коэффициента отражения, например, в диапазоне мягкого рентгеновского диапазона (λ : 0,3–10 нм). Для этого можно воспользоваться формулами Френеля [3], записанными для случая отражения падающего из вакуума излучения:

$$\frac{E_{rS}}{E_{iS}} = \frac{\sin \theta - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}}; \quad (1.2)$$

$$\frac{E_{rP}}{E_{iP}} = \frac{\varepsilon \sin \theta - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}}{\varepsilon \sin \theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}} \quad (1.3)$$

где индексы S и P обозначают поляризацию излучения перпендикулярно и параллельно плоскости падения, соответственно, E_r и E_i – амплитуды отраженной и падающей волны, ε – диэлектрическая проницаемость среды, θ – угол скольжения, отсчитываемый от поверхности. Коэффициент отражения определяется следующим образом:

$$R_S = \left| \frac{E_{rS}}{E_{iS}} \right|^2 ; R_P = \left| \frac{E_{rP}}{E_{iP}} \right|^2 . \quad (1.4)$$

Правомерность данных формул для случая рентгеновского излучения обсуждалась в [2]. Считая, что эффектами пространственной дисперсии в рентгеновской области можно пренебречь и описывать вещество зависящей от частоты диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(\omega)$, а также считая, что граница раздела достаточно гладкая, вполне правомерно описание отражения рентгеновского излучения с помощью формул Френеля. Рассматривая случай нормального падения, согласно приведенным выше формулам, можно получить для коэффициента отражения:

$$R_F \cong \frac{|1-\varepsilon|^2}{16} \quad (1.5)$$

Теперь, воспользовавшись оптическими константами, взятыми из [4], например, для Ni на длине волны 1 нм получим коэффициент отражения $R_F \cong 2,58 \cdot 10^{-7}$.

Говоря о полном внешнем отражении, следует ввести понятие критического угла (θ_c), который определяется из условия

$$\cos \theta_c = \sqrt{\varepsilon} . \quad (1.6)$$

Пользоваться этим понятием можно, если пренебречь поглощением ($\gamma=0$), то есть если рассматривать диапазон жесткого рентгеновского излучения. В случае мягкого рентгеновского и экстремально ультрафиолетового диапазонов поглощение нужно учитывать, а вместо критического угла имеет смысл говорить об области углов скольжения, при которых происходит заметное отражение.

Необходимость создания многослойной структуры для отражения излучения в рентгеновском диапазоне (диапазон длин волн: 0,01–100 нм) связана с тем, что она позволяет получать коэффициент отражения рентгеновского излучения величиной в десятки процентов от структуры при углах далеких от скользящих к поверхности, вплоть до нормального падения. Многослойное зеркало (МЗ) представляет собой последовательность тонких пленок, как правило, нанометровой толщины, из двух и более материалов, нанесенных на подложку. В качестве подложки часто используются сверхгладкие (среднеквадратичная величина шероховатости 0,1–0,2 нм) пластины монокристаллического кремния. Также это могут быть сверхгладкие поверхности различной формы из оптических материалов (кварц, ситалл, zerodur и др.) Используемые в МЗ материалы формируют его период, который повторяется заданное (N) число раз.

Принцип действия МЗ основан на конструктивной интерференции волн, отраженных от различных границ раздела структуры. Схематично МЗ изображено на рис. 1.1. Для того, чтобы отраженные от границ волны складывались в фазе необходимо выполнение условия Брэгга:

$$2 \cdot d \cdot \sin\theta_m = m \cdot \lambda, \quad (1.7)$$

где d – период многослойного зеркала, θ – угол скольжения, $m = 1, 2, 3\dots$ – порядок дифракции, λ – длина волны излучения. В случае рентгеновского излучения для нормального падения период структуры оценивается от десятков до десятых долей нанометров, что сравнимо с величиной атомного монослоя.

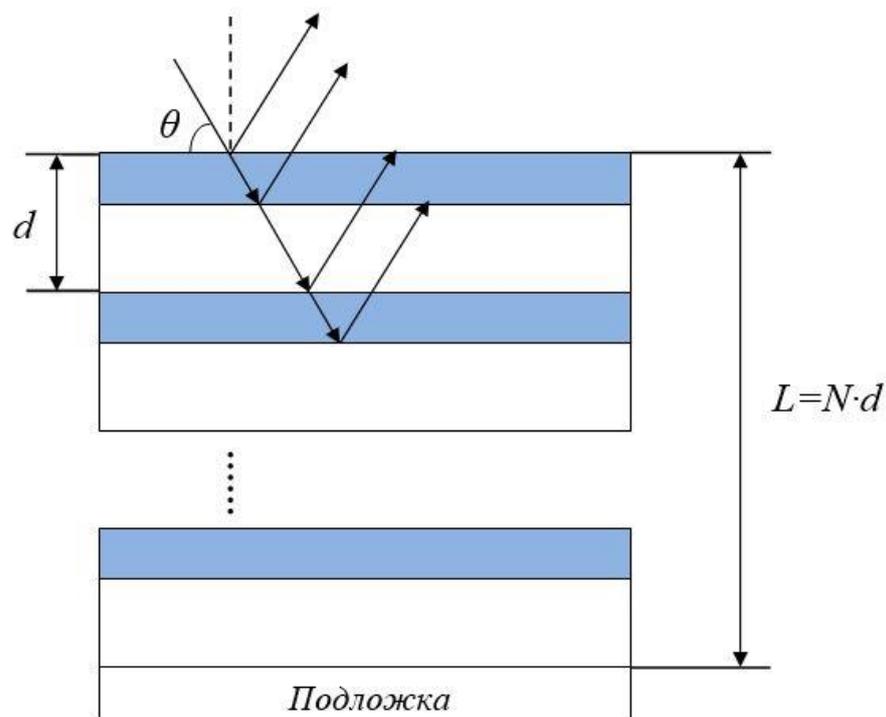


Рис. 1.1. Схематичное изображение многослойного зеркала и хода лучей. На рисунке: L – суммарная толщина зеркала, d – период структуры, N – число периодов, θ – угол скольжения.

Проектируя МЗ, следует помнить, что, начиная от длин волн мягкого рентгеновского излучения и выше, у всех веществ значительно возрастает поглощение. Поэтому, подобрав период многослойной структуры, удовлетворяющий условию (1.7), не очевидно, что мы получим большой коэффициент отражения. Однако, в [2] указывается, что теоретически возможны коэффициенты отражения величиной 40–80%, но для этого нужно правильным образом подбирать как материалы МЗ, так и толщины слоев.

1.1.2. Основные отражательные характеристики. Выбор материалов

Основными отражательными характеристиками многослойных зеркал являются пиковое значение коэффициента отражения (R), ширина кривой отражения на половине высоты ($\Delta\lambda$), интегральный коэффициент отражения (R_i), представляющий собой интеграл от спектральной или угловой зависимости коэффициента отражения. Вместо спектральной ширины также используют такой термин, как спектральная селективность. Данная величина представляет собой

отношение длины волны, на которой многослойное зеркало имеет максимум отражения, к ширине на полувысоте коэффициента отражения ($\lambda/\Delta\lambda$). Если говорить о предъявляемых к данным величинам требованиям, то, как правило, R должен быть как можно выше, а предпочтения по $\Delta\lambda$ зависят от решаемой задачи. В спектроскопии или при монохроматизации излучения $\Delta\lambda$ должна быть меньше, а для задач, связанных со сбором излучения в широком спектре, наоборот, больше. На величины этих отражательных характеристик влияют многие факторы: оптические свойства материалов слоев МЗ, возможное перемешивание слоев в МЗ, образование химических связей между материалами, геометрические шероховатости границ, нарушение периодичности многослойной структуры, изменение плотности материалов слоев в зависимости от их толщин.

Процесс создания высокоотражающего МЗ, обеспечивающего необходимую спектральную селективность, начинается с подбора материалов и толщин слоев этих материалов. Принципы подбора веществ и толщин их слоев в многослойных структурах следуют из методов расчета их оптических параметров. Существует ряд методов расчета произвольного многослойного зеркала для любых значений диэлектрических проницаемостей материалов слоев и любых углов падения. Можно выделить общие подходы, такие как методы рекуррентных соотношений [5] и характеристической матрицы [3]. Есть и специфические подходы, основанные на том, что ϵ всех веществ в рентгеновском диапазоне близки к единице: так называемый метод медленных амплитуд [6] или методы, описывающие дифракцию на кристаллах.

В методе рекуррентных соотношений задается многослойная структура из $2N$ слоев заданной толщины. Границы полагаются гладкими. Структура представляется в виде, изображенном на рис. 1.2. Численно решается задача об отражении электромагнитной волны для заданной длины волны и угла падения (φ) на каждой границе каждого j -го слоя по очереди. Полагается, что из вакуума падает электромагнитная плоская монохроматическая волна ($\mathbf{E}(r,t)$ и $\mathbf{H}(r,t)$), которая в общем случае поляризована. В случае s -поляризации ненулевыми являются компоненты поля E_y , H_x , H_z , для p -поляризации – это H_y , E_x , E_z . Для учета обеих поляризаций вводится функция

$$U(z) = \begin{cases} E_y(z) & s - \text{поляризация} \\ H_y(z) & p - \text{поляризация} \end{cases} \quad (1.8)$$

которая внутри каждого j -го слоя удовлетворяет волновому уравнению

$$U''(z) + k^2(\varepsilon_j - \sin^2 \varphi)U(z) = 0, \quad (1.9)$$

где $k=2\pi/\lambda$, $j = 0, 1, \dots, 2N+1$ ($2N+1$ – подложка бесконечной толщины). В результате, задавая решение уравнения в виде суммы падающей и отраженной плоских волн и учитывая условия непрерывности тангенциальных компонент $E(z)$ и $H(z)$ на любой границе раздела, получим решение в виде рекуррентных соотношений для амплитуд U_j^i и U_j^r , которые полностью описывают отражение электромагнитной волны от многослойной структуры. Процедура вычисления начинается со стороны подложки ($j=2N$ – первый слой от подложки) и заканчивается на слое, граничащем с вакуумом ($j=0$), при этом энергетический коэффициент отражения для всей структуры будет равен

$$R = \left| \frac{U_0^r}{U_0^i} \right|^2. \quad (1.10)$$

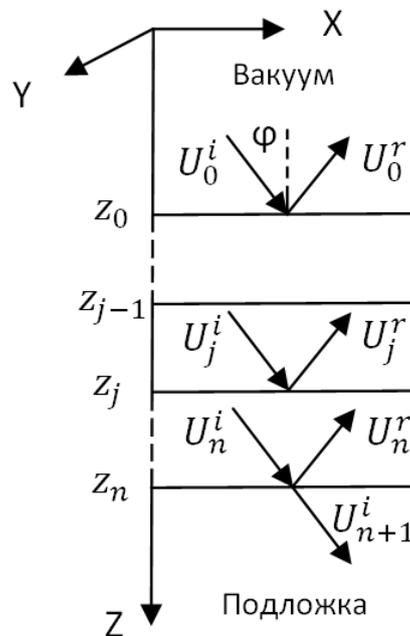


Рис. 1.2. Отражение электромагнитного излучения от многослойной структуры.

Метод рекуррентных соотношений позволяет точно рассчитать коэффициент отражения, но только если мы изначально зададим материалы, толщины слоев (знаем нужное соотношение толщин между слоями материалов). Решение обратной задачи – нахождение оптимальных структурных параметров многослойного зеркала из условия максимизации коэффициента отражения в таком случае представляется громоздкой задачей. То есть, приходится перебирать по очереди материалы и их толщины, высчитывая каждый раз коэффициент отражения.

Гораздо выгоднее сначала аналитически определить состав МЗ с помощью метода медленных амплитуд, а уже затем уточнить, если нужно, его оптические характеристики точным численным расчетом. В методе медленных амплитуд рассматривается многослойное зеркало общей длиной $L=N \cdot d$ с диэлектрической проницаемостью в виде периодической функции (рис. 1.3). Также решается волновое уравнение, например, для s-поляризованного излучения

$$E''(z) + k^2(\varepsilon(z) - \sin^2 \varphi)E(z) = 0, \quad (1.11)$$

где при $z < 0$, $\varepsilon(z) = 1$; при $z > L$, $\varepsilon(z) = \varepsilon_{\text{подложки}}$.

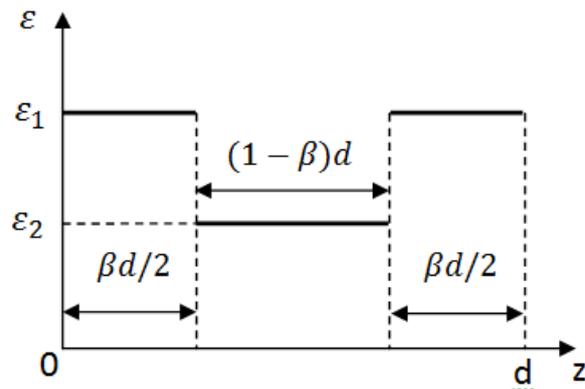


Рис. 1.3. Вид функции диэлектрической проницаемости в масштабе одного периода.

Диэлектрическая проницаемость раскладывается в ряд Фурье по косинусам благодаря выбранному виду функции на рис. 1.3:

$$\varepsilon(z) = \mu + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos(2\pi m z/d), \quad (1.12)$$

где $0 \leq z \leq L$; $\mu = \beta \varepsilon_1 + (1 - \beta) \varepsilon_2$ – среднее по периоду значение диэлектрической проницаемости; $\beta = d_1/d$ – доля сильнопоглощающего материала в периоде; $B_m = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin(\pi m \beta)/(\pi m)$ – модуляция структуры, которая по модулю $\ll 1$, так как в рентгеновском диапазоне скачок диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) очень мал. Поле волны в структуре представляется в виде:

$$E(z) = E_+(z)e^{i\pi m z/d} + E_-(z)e^{-i\pi m z/d}, \quad (1.13)$$

где $0 \leq z \leq L$; $m = 1, 2, \dots$; E_+ и E_- – амплитуды волн, распространяющихся в положительном и отрицательном направлении оси Z . Подставив (1.13) в (1.11), получим уравнения, в котором будут присутствовать быстро осциллирующие функции. Так как нам интересен резонансный случай взаимодействия падающей волны с многослойной структурой, то естественно предположить, что $E_{\pm}(z)$ – медленно меняющиеся функции по сравнению с осциллирующими множителями в (1.13). Таким образом, для $E_{\pm}(z)$ можно пренебречь второй производной и быстро осциллирующими членами в полученном уравнении и записать систему укороченных уравнений для амплитуд:

$$\frac{dE_{\pm}}{dz} \pm \frac{2i\pi d}{n\lambda^2} b_m E_{\pm}(z) \mp \frac{i\pi d}{m\lambda^2} B_m E_{\mp}(z) = 0, \quad (1.14)$$

где $b_m = (m\lambda/2d)^2 + \sin^2 \varphi - \mu$ – брегговский резонансный член, в случае резонанса он по модулю $\ll 1$. Граничные условия задаются следующим образом: $E_+(0) = 1$ и $E_-(L) = 0$. Первое означает, что на МЗ падает волна единичной амплитуды, второе – в подложке есть только прошедшая волна. Коэффициент отражения при этом будет выражаться так

$$R = |E_-(0)|^2. \quad (1.15)$$

В частном случае полубесконечного МЗ поле внутри структуры имеет вид:

$$E(z) = (e^{i\pi mz/d} + r e^{-i\pi mz/d}) e^{-S_m z}, \quad (1.16)$$

где $z \geq 0$; r – амплитудный коэффициент отражения; S_m – коэффициент затухания волны в глубине структуры, который записывается в следующем виде [2]:

$$S_m = \frac{\pi m}{2d \cos^2 \varphi} \sqrt{\frac{B_m^2 \sigma^2}{4} - b_m^2}, \quad (1.16)$$

σ – фактор, связанный с поляризацией волны, равный 1 для s-поляризации и $\cos 2\varphi$ для p-поляризации. В резонансном случае справедливо: $|S_m| \ll \pi m/d$, что означает медленное изменение амплитуд. Следовательно, в условиях резонанса ($|b_m| \ll 1$) волны рентгеновского излучения со слабомодулированной ($|B_m| \ll 1$) многослойной структурой, сделанные выше приближения оправданы.

Если предположить, что МЗ не обладает поглощением, то коэффициент затухания в (1.16) будет равен нулю, а коэффициент отражения – единице [2], если выполняется условие

$$\frac{|B_m \sigma|}{2} = |b_m|, \quad (1.17)$$

В итоговом выражении для коэффициента отражения из (1.15) (полное выражение для которого можно найти в [2]) можно выделить ряд важных параметров, в первую очередь, это

$$g = \frac{Im(\varepsilon_2)}{Im(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}; \quad f = \frac{Re(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{Im(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}. \quad (1.18)$$

На основе выражений (1.18) формулируются следующие принципы выбора материалов и толщин многослойной структуры с целью достижения максимального коэффициента отражения. Материалы подбираются так, чтобы на границе между ними имелся скачок диэлектрической проницаемости. То есть, учитывая вид ε из (1.1), один материал относительно другого будет при этом сильнее поглощать (для

определенности сопоставим ему индекс 1). В качестве слабопоглощающего материала выбирается такой, у которого значение $Im(\varepsilon_2)$ должно быть как можно меньше. Сильнопоглощающий материал необходимо выбрать так, чтобы отношение $|Re(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)|/Im(\varepsilon_1)$ было бы как можно больше. После этого выбирается параметр β из условия [6]:

$$tg(\pi\beta_{opt}) = \pi(\beta_{opt} + g), \quad (1.19)$$

где β_{opt} – оптимальное отношение толщины сильнопоглощающего материала к величине периода МЗ, при котором коэффициент отражения достигает своего максимального значения. Зная период многослойной структуры, который определяется исходя из задачи (заданы длина волны и угол скольжения) по условию (1.7), вычисляется толщина слабопоглощающего материала.

Величина другой важной оптической характеристики многослойной структуры, спектральной селективности ($\lambda/\Delta\lambda$), не обязана всегда быть строго минимальной или максимальной. Она, как отмечалось выше, зависит от типа решаемой задачи. Например, в таком развивающемся приложении многослойных зеркал, как диагностика плазмы [7, 8], часто ставится задача выделения какого-либо участка спектра, при этом не нужно, чтобы в спектрометр попадало излучение от других областей. Поэтому требуется обеспечить достаточно малую спектральную ширину ($\Delta\lambda$), соответственно высокую спектральную селективность. Наоборот, в проекционной литографии экстремального ультрафиолетового диапазона, где МЗ используются для отражения рентгеновского излучения [9, 10], требуется обеспечить умеренную спектральную селективность. Это связано с ускорением производства чипов, чем больше спектральная ширина ($\Delta\lambda$), тем большая отраженная мощность, тем меньше время требуется, чтобы засветить необходимую область фоторезиста.

1.1.3. Свойства бериллия как элемента рентгеновской оптики

В п.1.1.2. рассмотрено формирование элементарной ячейки многослойной структуры из двух материалов, один из которых является слабопоглощающим, другой сильнопоглощающим. В англоязычной литературе встречаются другие названия таких материалов: «spacer» и «absorber», соответственно. Также встречаются комбинация «лёгкий» и «тяжелый» материалы. Однако, один и тот же материал может быть спейсером в паре с одним материалом, и при этом абсорбером в паре с другим, поэтому такие понятия относительны.

Создавая рентгенооптический элемент для работы в том или ином диапазоне длин волн, следует учитывать индивидуальные оптические характеристики материалов, из которых он состоит. А именно параметры δ и γ , выступающие в качестве дисперсионных добавок в выражении для диэлектрической проницаемости (1.1). Зависимость данных величин от длины волны излучения для каждого материала характеристична. Это связано с дискретностью энергетических уровней в атоме – каждый материал начинает сильно поглощать, если энергия падающего излучения достаточна для перехода электрона в возбужденное состояние. Таким образом, это обуславливает появление краев поглощения вещества.

Бериллий – четвертый элемент периодической системы химических элементов, имеет два электрона на 1s оболочке, два валентных электрона на 2s оболочке и один К-край поглощения с энергией 109 эВ ($\lambda \approx 11,1$ нм) [11]. Если рассматривать бериллий как спейсер в периоде МЗ, то можно выделить две подходящих области длин волн: $\lambda < 4,4$ нм и $\lambda > 11,1$ нм, где он меньше всего поглощает (малое значение γ). В областях мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов также можно выделить другие элементы, подходящие на роль спейсера. Такие, например, как Si ($\lambda > 12,4$ нм), Al ($\lambda > 17,1$ нм), Mg ($\lambda > 25,3$ нм). Дисперсионные зависимости добавок к показателю преломления некоторых материалов в спектральном диапазоне 2–40 нм приведены на рис. 1.4. Среди материалов, представленных на графике, «тяжелыми» являются Мо и Zr (большое значение γ). Данные взяты из [4], где приведены добавки α и β , входящие в выражение для показателя преломления $n = 1 - \alpha + i \cdot \beta$ и имеющие тот же смысл, что добавки в выражении (1.1).

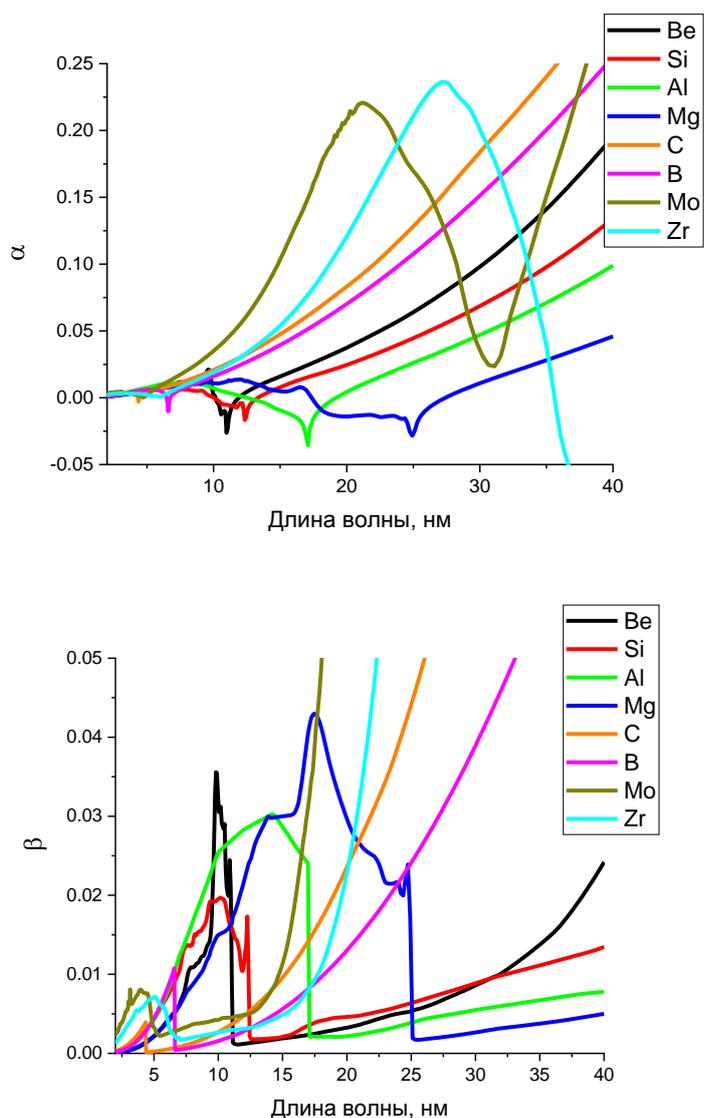


Рис. 1.4. Дисперсионные зависимости добавок α и β в выражении для показателя преломления ($n=1-\alpha+i\cdot\beta$) «легких» и «тяжёлых» материалов, построенные по данным из [4].

Из рис. 1.4 видно, что в рассматриваемой области длин волн бериллий является одним из самых слабопоглощающих материалов, обладает довольно гладкими дисперсионными зависимостями, что даёт возможность создавать высокоотражающие многослойные зеркала в довольно широком диапазоне рентгеновского излучения, а также бериллий способен конкурировать (с бором и углеродом) по величине поглощения даже в области $\lambda < 4,4$ нм. Из приведенной зависимости $\alpha(\lambda)$ следует, что бериллий теоретически может использоваться в качестве рассеивающего материала в паре с рядом материалов: Si, Al, Mg.

1.2. Многослойные зеркала для солнечной астрономии

1.2.1. Наблюдения солнечной короны в рентгеновском диапазоне

Солнце – это ближайшая к нам звезда, являющаяся одним из основных объектов астрофизических исследований. Близкое расположение дает возможность изучения звезды с относительно высоким пространственным и временным разрешением. На основании полученных данных можно делать выводы об общих физических процессах, которые проходят как в глубине, так и на поверхности звезд. Особое внимание в таких исследованиях отводится солнечной короне – наиболее удивительной области солнечной атмосферы, являющейся внешней оболочкой Солнца и имеющей температуру в триста раз выше, чем в хромосфере, нижнем слое атмосферы Солнца.

Хромосфера — это неоднородный по структуре слой солнечной атмосферы, расположенный непосредственно над фотосферой [12]. Хромосфера весьма неоднородна и состоит в основном из продолговатых вытянутых язычков (спикул). Температура этих хромосферных струй в два-три раза выше, чем в фотосфере, а плотность в сотни тысяч раз меньше. Общая протяжённость хромосферы 10–15 тыс. километров. Температура хромосферы растёт с высотой от $6 \cdot 10^3$ К до примерно $2 \cdot 10^4$ К. При такой температуре в хромосфере Солнца формируется интенсивное излучение в линиях атома водорода, в частности в линии Н-альфа (спектральная линия серии Бальмера с $\lambda=656,28$ нм).

Рост температуры в хромосфере объясняется распространением волн и магнитных полей, проникающих в неё из конвективной зоны. Скорости тепловых движений частиц возрастают, учащаются столкновения между ними, и атомы теряют свои внешние электроны: вещество становится горячей ионизованной плазмой. Эти же физические процессы поддерживают и необычайно высокую температуру самых внешних слоев солнечной атмосферы, которые расположены выше хромосферы. В короне Солнца температура продолжает расти вплоть до $2 \cdot 10^6$ К, а в отдельных областях температура может достигать $14,5 \cdot 10^6$ К (вспышка) [13]. Основное излучение короны из-за ее высокой температуры лежит в рентгеновской части солнечного спектра. При этом температуру нагрева некоторого слоя солнечной короны можно сопоставить с энергией характеристического излучения

многократно ионизованного атома, находящегося в этом слое. Так, например, однократно ионизованный атом гелия He II, излучающий на длине волны 30,4 нм, соответствует температуре нагрева солнечной атмосферы в этом слое равной $8 \cdot 10^4$ К, восьмикратно ионизованный атом железа Fe IX, излучающий на длине волны 17,1 нм, соответствует температуре нагрева солнечной атмосферы в этом слое равной $1,3 \cdot 10^6$ К, линия ионизованного железа Fe XII ($\lambda = 19,5$ нм) соответствует $T = 1,6 \cdot 10^6$ К, а линия Fe XV соответствует $T = 2 \cdot 10^6$ К.

Вопросы, связанные с механизмами нагрева короны, ускорением солнечного ветра, природой солнечных вспышек и циклов солнечной активности до настоящего времени являются нерешенными вопросами фундаментальной физики. При этом исследования этих процессов являются актуальными, так как они напрямую определяют состояние межпланетной и околоземной среды. Они влияют на состояние магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли и тем самым крепко связаны с деятельностью человека [14, 15]. Данные исследования объединены в одну область под названием «космическая погода».

Наблюдения за короной в основном ведутся с использованием двух методов наблюдения. Во-первых, это метод телескопических изображений, позволяющий получать информацию об отдельных областях выделения энергии: исследование их пространственной структуры, определение их направления движения и объемов переносимой плазмы. Вторым является спектроскопический метод, с помощью которого проводится диагностика состояния вещества, а именно электронная и ионная плотность плазмы, её температура. Наибольшую информацию можно получить, комбинируя эти методы, что и привело к появлению метода изображающей спектроскопии мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов. При этом регистрируется изображение солнечного диска в нескольких интенсивных монохроматических линиях ионов с большим зарядом с одновременным получением телескопических изображений в узких интервалах спектра излучения. Так по информации от монохроматических изображений можно судить о температуре плазмы в том или ином слое солнечной атмосферы, а от телескопических изображений – о конфигурации магнитных структур в таком слое. Данный метод реализуется в комплексах специальной исследовательской аппаратуры – космических обсерваториях.

Космические обсерватории – это специальная космическая техника, предназначенная для наблюдения за астрономическими объектами на длинах волн электромагнитного спектра, которые не могут проникать в атмосферу Земли из-за поглощения такого излучения. Таким образом, исследования солнечной короны в диапазоне мягкого рентгеновского излучения (например, линии 17,1 нм и 30,4 нм) возможны только за пределами земной атмосферы. При этом к такой экспериментальной аппаратуре должны предъявляться особые требования, она должна обладать высоким спектральным и пространственным разрешением, а также большим динамическим диапазоном регистрируемых интенсивностей. Кроме того, для сопоставления разнообразных процессов, происходящих в отдельных слоях короны Солнца, необходимо проводить непрерывные наблюдения в широком поле зрения с высоким временным разрешением.

В конце XX века большой объем научных данных о рентгеновском излучении короны предоставил японский спутник *Yohkoh* [16], работавший на орбите с 1991 по 2001 годы. В XXI веке эти наблюдения проводили спутник *Коронас-Ф* [17], *SOHO* [18] и *TRACE* [19]. В 2009 году на орбиту был выведен российский спутник *Коронас-Фотон* [20] с комплексом телескопов *ТЕСИС* [21] на борту для получения новых высокоточных изображений короны. В 2010 году стартовала обсерватория *SDO*. В 2018 году был запущен солнечный зонд *PSP (Parker Solar Probe)* [22], а в 2020 году – *Solar Orbiter* [23]. С помощью приборов дистанционного зондирования последнего из перечисленных аппаратов в 2020 году удалось зафиксировать новый тип солнечных вспышек – «костерки» (англ. «campfires»). Это потоки плазмы вытянутой формы, возникающие на высоте 1–5 тыс. километров над фотосферой и имеющие протяженность до 4 тыс. километров. Длительность таких вспышек от десятков до двух сотен секунд. При этом эти участки имеют довольно высокую температуру 1– $1,6 \cdot 10^6$ К, характерную для некоторых слоев солнечной короны. Экспериментальные данные были получены с помощью прибора *EUI (Extreme Ultraviolet Imager)* [24], формирующего изображение в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (канал 17,4 нм). Благодаря этим данным ученые в [25] смоделировали процесс, предложив механизм формирования таких вспышек, который приоткрывает завесу тайны высокой температуры солнечной короны. В качестве основного механизма образования таких «костерков» был предложен процесс пересоединения магнитных

линий [26]. Вспышки формируются почти параллельными силовыми линиями магнитного поля, имеющими вид сильно скрученных жгутов. На основе анализа наблюдений и своей модели авторы предварительно заключают, что количество энергии, выделяющейся при раскручивании таких жгутов, достаточно для нагрева короны до наблюдаемых температур. Окончательно подтвердить данное предположение помогут дальнейшие наблюдения с помощью такой аппаратуры, как EUV.

Наряду с полноразмерными космическими аппаратами для проведения прикладных и фундаментальных космических исследований все более и более распространенной платформой становятся наноспутники. Для такого рода спутников в 1999 году в США был предложен размерный стандарт Кубсат (CubeSat) [27], который установил их фиксированные габариты, меняющиеся кратно. Минимальный размер – это один кубический элемент 1U (unit) размером 10x10x10 см и массой до 1,33 кг. Под стандарты Кубсат разрабатывается специализированное оборудование: различные конструкционные элементы, батареи, платы, датчики, системы коммуникации и т.д. Среди такого оборудования есть и телескопы, которые предназначены для получения изображений солнечной короны, необходимых для мониторинга солнечной активности и выработки прогноза космической погоды. В [28] говорится о семействе солнечных вакуумных ультрафиолетовых (ВУФ) телескопов, разработанных в рамках программы «Универсат» для размещения на наноспутниках формата 6U. Также указывается, что в области физики Солнца уже проведен ряд экспериментов по исследованию интегрального рентгеновского излучения короны в диапазоне ~0.5–30 КэВ (MinXSS [29], «Ярило» [30]), которые показали возможность переноса части прикладных исследований на наноспутники. Несмотря на сложность конструкций телескопов ВУФ диапазона, обычно используемых в космических обсерваториях, существует возможность создания их миниатюрных аналогов для размещения их на наноспутниках с ограниченными ресурсами. Подобные проекты в настоящее время активно прорабатываются в ведущих космических державах [31].

1.2.2. Свойства многослойных зеркал для солнечной астрономии

С помощью метода изображающей спектроскопии можно провести соответствие между отдельными слоями солнечной атмосферы и процессами, происходящими в этих слоях. Для этого регистрируются изображения в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах. При этом весь диапазон регистрируемых длин волн разбивается на несколько каналов наблюдения. Полученные данные интерпретируются в соответствии со своим каналом. Весь диапазон лежит в пределах 0,1–100 нм [32] и делится на участки, границы которых являются условными и определяются существующими технологиями.

На данный момент наиболее используемыми для исследований короны Солнца являются диапазоны длин волн 0,1–0,9 нм и 10–60 нм [32]. В этих диапазонах выбран ряд линий, представляющих наибольший интерес для решения научных задач. Данные линии обладают рядом особенностей: они излучаются ионами большого количества элементов, имеют высокую интенсивность, возбуждаются при различных температурах, соответствующих различным слоям и структурам короны Солнца, позволяют проводить спектральную диагностику.

Диапазон 10–60 нм содержит большое количество интенсивных спектральных линий с температурами возбуждения от $2 \cdot 10^4$ К (переходной слой) до $2 \cdot 10^7$ К (вспышки). Для работы с излучением на данных длинах волн широко используются многослойные рентгеновские зеркала, как узкополосные (спектральная селективность: $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$), так и широкополосные ($\lambda/\Delta\lambda \sim 2$). Пиковые коэффициенты отражения МЗ в этом диапазоне лежат в диапазоне 20–70%, что позволяет создавать оптику с высокой светосилой.

В диапазоне 17–31 нм лежит ряд интенсивных линий ионов, наиболее распространенных в солнечной короне элементов (He, Fe, Si и др.), представляющих большой интерес для астрофизики. Линии элементов, относящихся к различным слоям атмосферы Солнца, могут по спектру располагаться довольно близко друг к другу. Например, линия относительно «холодного» He II (30,4 нм, переходной слой, температура порядка $8 \cdot 10^4$ К) располагается между «горячими» Fe XV ($\lambda=28,4$ нм) и Fe XVI ($\lambda=33,5$ нм). Ионы Fe XV и Fe XVI формируются во внешних областях солнечной короны при температурах порядка $2,5 \cdot 10^6$ К и, соответственно, несут информацию о процессах, протекающих там, а не в переходном слое. Поэтому для

выделения определённых спектральных линий, например, в телескопических приборах, важно, чтобы многослойное зеркало имело узкую спектральную полосу пропускания $\Delta\lambda$. Основным препятствием для создания узкополосных многослойных зеркал, которые должны работать в области экстремального ультрафиолета, является поглощение материала. Как правило, снижение $\Delta\lambda$ достигается за счет уменьшения доли сильнопоглощающего материала в периодах МЗ. Это всегда сопровождается значительным уменьшением коэффициента отражения от структуры.

Пиковый коэффициент отражения всегда должен быть как можно больше для обеспечения высокого временного разрешения, которое определяется накоплением количества фотонов, необходимого для качественного изображения. Максимизация коэффициента отражения позволит уменьшить время экспозиции в эксперименте, что важно с точки зрения исследования быстропротекающих процессов.

Для обнаружения активных областей короны, ответственных за формирование микровспышек [33], являющихся одним из мелкомасштабных процессов энерговыделения в солнечной атмосфере, требуется высокое пространственное разрешение. Природа и происхождение микровспышек остаются предметом исследований и дискуссий. В [34] для решения этой задачи рассматривается спутниковая обсерватория, которая должна обеспечивать рекордно высокое пространственное разрешение 0,18 угловых секунд (130 км на поверхности Солнца). Прибор METIS [35] – коронограф-спектрометр, установленный на находящейся сейчас за пределами Земли обсерватории Solar Orbiter, позволяет разрешать области на поверхности Солнца размером до 2000 км.

Таким образом, для наблюдения и изучения процессов, протекающих в солнечной короне, разрабатываемые современные космические обсерватории, должны обеспечивать рекордно высокое пространственное, спектральное и временное разрешение. Необходимые характеристики оборудования, используемого для наблюдений за Солнцем в рентгеновском диапазоне, обеспечивают правильно подобранные составы многослойных зеркал – элементов оптических схем этих приборов.

Типичной схемой проектирования многослойных зеркал является классическое сочетание «легкого» и «тяжелого» материала в периоде. Как

обсуждалось в п.1.1, в качестве «легкого» выбирается материал с минимальным поглощением в рабочем диапазоне длин волн. Ему в пару подбирается «тяжелый» материал, как правило, обладающий большим поглощением и удовлетворяющий условию максимизации скачка диэлектрической проницаемости на границе слоёв.

Спроектированные по классической схеме МЗ способны обеспечить высокий пиковый коэффициент отражения (из-за значительной разницы в показателях преломления). При этом $\Delta\lambda$ остаётся большой (из-за большого суммарного поглощения в структуре). Для ряда задач это может оказаться неприемлемым. Например, в [34, 36] рассматриваются обсерватории, в состав аппаратуры которых, в частности, предполагается включить телескопы с каналами регистрации 17,1 и 30,4 нм. Для задач таких обсерваторий из-за близости в спектре линий других ионов требуется $\Delta\lambda < 0,42$ нм для длины волны 17,1 нм и $\Delta\lambda < 1,2$ нм для 30,4 нм. В случае МЗ, спроектированных по традиционной схеме, параметр $\Delta\lambda$ не удовлетворяет поставленным условиям, как можно видеть по данным из таблицы 1.1.

Таблица 1.1. Примеры многослойных зеркал, предназначенных для работы на длинах волн 17,1 нм и 30,4 нм.

Зеркало	R, %	$\Delta\lambda$, нм	Ссылки
$\lambda=17,1$ нм			
Al/Mo/SiC	53,4	0,76	[37, 38]
Al/Mo/B ₄ C	55,5	0,875	[37]
Mo/Si	54,0	0,875	[39]
Al/Zr	56,0	0,6	[40]
Al/Si	48,0	0,48	[41]
$\lambda=30,4$ нм			
Mo/Si	22,0	~4	[40]
SiC/Mg	40	1,5	[42]
Mg/Sc/SiC	50,0	1,65	[43]
Si/Mg	5,6	1,35	[44]
B ₄ C/Mg	0,2	1,85	[44]

С 1980-х годов базовой парой материалов для синтеза отражающих покрытий, предназначенных для работы в диапазоне длин волн 13–30 нм, в котором проводилась диагностика солнечной короны, являлось сочетание молибдена и кремния. Синтезированные зеркала на их основе имеют относительно высокий коэффициент отражения во всем указанном диапазоне, хотя и спадающий в области более длинных волн (70% вблизи 13 нм и до 25% в окрестности 30 нм). В частности, МЗ, изготовленные для канала 17,1 нм прибора SUVI [45] имеют следующие характеристики: $R=48\%$ при $\Delta\lambda=0,7$ нм.

Фактически теоретического предела ($R_{\text{теор}}=55\%$ для 17,1 нм) достигли отражательные характеристики зеркал обсерватории КОРОНАС-И [46]: $R=54\%$ при $\Delta\lambda=0,875$ нм. Следовательно, дальнейшее улучшение этих характеристик становится невозможным или крайне маловероятным. В то же время для повышения спектрального и временного разрешения телескопов нового поколения необходимо улучшение данных параметров.

Кроме того, для диапазона длин волн, больших 17 нм создавались МЗ Si/Mo₂C. В [47] отмечаются отражательные характеристики МЗ Si/Mo₂C, синтезированного для телескопа обсерватории TRACE. При толщинах материалов $d(\text{Si})=6.3$ нм, $d(\text{Mo}_2\text{C})=2.7$ нм максимум отражения структуры при углах падения, близких к нормали, приходится на $\lambda=17,3$ нм. При этом $R=52\%$, $\Delta\lambda=1$ нм. Эти характеристики вполне сопоставимы с таковых зеркал Mo/Si, а значит, не удовлетворяют условиям новых астрофизических экспериментов. Главным образом, это утверждение относится к величине спектральной селективности.

Следует отметить, что рассмотренные выше МЗ обладают высокой временной стабильностью отражательных характеристик. При хранении в комнатных условиях отражение сохраняется, по крайней мере, в течение нескольких лет. Соответственно, возникает задача разработки зеркал с отражательными характеристиками лучше, чем у Mo/Si и с не меньшей временной стабильностью.

В качестве альтернативы следует рассматривать алюминий-содержащие МЗ. Алюминий, имеющий край поглощения $\lambda_L=17,04$ нм, является одним из самых прозрачных материалов в области длин волн $\lambda>17,1$ нм. Поэтому многослойные зеркала на его основе потенциально могут сочетать высокие отражение и спектральную селективность. В последние годы многие научные группы работают

именно в этом направлении. Ими рассматриваются как двухкомпонентные МЗ, в частности, Al/SiC, Al/Mo, Al/Y, Al/Zr, так и трехкомпонентные МЗ типа Al/Mo/SiC и Al/Mo/B₄C.

МЗ Al/SiC изучалась, например, в [47-51]. В [48] МЗ было оптимизировано на $\lambda=19,5$ нм. При этом его параметры составили: R=27%, $\Delta\lambda=0,65$ нм – пиковый коэффициент отражения существенно ниже расчетного (50%). В [50] МЗ оптимизировано уже на более короткую длину волны – 17,5 нм. Здесь достигнута величина R 37,8% (при теоретическом пределе 55%).

Столь значительные отклонения экспериментальных данных от теоретического расчета в исследованиях [49, 51] объясняются перемешиванием алюминия и карбида кремния на границах раздела. Об этом говорят данные вторичной ионной масс-спектрометрии и рентгеновской рефлектометрии. В [49] величина межслоевой шероховатости оценена в 2,8 нм при периоде МЗ около 9 нм.

Не обладающее преимуществом в спектральной селективности перед Mo/Si-зеркалами МЗ Al/Mo, тем не менее, теоретически превосходит их в отражении, достигая $R_{\text{теор}}=64\%$. Такие МЗ изучались в работах [52, 53]. И опять же наблюдалось значительное отклонение экспериментальных данных от теоретических. На практике пиковый коэффициент отражения составил лишь 33,5%. Здесь причиной считается шероховатость слоев алюминия. Отмечено, что с ростом числа периодов структуры, молибден производит сглаживающий, хотя и не достаточный, эффект.

Еще более теоретически перспективными являются МЗ Al/Y ($R_{\text{теор}}=70\%$). Они изучались в [47]. В этом случае результаты оказались еще более далекими от ожиданий. Коэффициент отражения МЗ Al/Y деградировал буквально в первые же часы после синтеза. Это объясняется взаимодиффузией материалов на границах раздела и/или окислением пленок. Для предотвращения этих эффектов авторы применили методику барьерных слоев, осаждая между основными материалами по 0,3 нм углерода. Многослойная структура Al/C/Y/C после напыления имела R всего 42%. Однако и в этом случае деградацию полностью остановить не удалось. Она существенно замедлилась, но уже через месяц измерения показали R на уровне 25%.

Синтез многокомпонентных (число материалов в периоде более двух) применили и авторы [37, 38], предложившие МЗ Al/Mo/SiC и Al/Mo/B₄C. Уменьшение шероховатости и, соответственно, приращение коэффициента

отражения в этом случае, видимо, происходит за счет нескольких эффектов. Во-первых, это антидиффузионный эффект – третий материал препятствует взаимодиффузии и химическому взаимодействию первых двух. Во-вторых, это эффект снижения шероховатости пленок.

Применив такой подход, авторы добились заметного улучшения отражательных характеристик зеркал, оптимизированных на 17,5 нм. Для Al/Mo/SiC коэффициент отражения и спектральная селективность: $R=53,4\%$, $\Delta\lambda=0,76$ нм; для Al/Mo/W₄C: $R=55,5\%$, $\Delta\lambda=0,875$ нм. Последняя структура также изучалась на длине волны 20,9 нм, при этом $R=49,8\%$, $\Delta\lambda=1,4$ нм. Эти характеристики уже превосходят характеристики Mo/Si-зеркал, изготовленных для обсерваторий TRACE и КОРОНАС-И.

В работе [40] приведены результаты измерения отражательных характеристик структур Al/Zr для длины волны 17,1 нм с долей циркония в периоде 0,36: $R = 56\%$, $\Delta\lambda = 0,61$ нм. Результаты моделирования показывают значительную величину межслоевой шероховатости: межслоевая область Zr-на-Al около 2 нм, Al-на-Zr порядка 0,5 нм.

Отдельного внимания заслуживает проблема временной стабильности многослойных зеркал. Все усилия по достижению рекордных отражательных характеристик МЗ могут сойти на нет, если эти характеристики ухудшатся ещё до запуска космического аппарата. Как показывает практика, такой промежуток времени может достигать 2 лет. Часто для исследования короны Солнца космические обсерватории ориентированы на регистрацию излучения ионов He II ($\lambda=30,4$ нм). Для работы в данной области длин волн применяются структуры Mo/Si [40, 54]. Пиковое значение коэффициентов отражения от таких МЗ с защитным слоем Ir достигает $R\approx 26\%$ на длине волны 30,4 нм, при этом спектральная ширина пика отражения на половине высоты составляет $\Delta\lambda=2,2$ нм. Такая значительная величина $\Delta\lambda$ приводит к тому, что наряду с излучением целевого иона He II детектор регистрирует сигнал от линий ионов Fe XV ($\lambda=28,4$ нм) и Fe XVI ($\lambda=33,5$ нм). К существенным недостаткам МЗ Mo/Si относится и высокий (до 50%) второй порядок отражения, приходящийся на окрестность длины волны 17 нм. В этой области солнечного спектра доминирует линия излучения иона Fe IX ($\lambda=17,1$ нм),

формирующегося на границе между короной и переходным слоем при температурах порядка 10^6 К.

В [55] сообщается о МЗ Al/Mo/W₄C. Пиковая отражательная способность этих структур на длине волны 30,4 нм составила 42% при полуширине, сравнимой с Mo/Si ($\Delta\lambda > 3$ нм). Второй порядок отражения таких зеркал превышает 20%. Также отмечается высокая временная стабильность отражательных характеристик этих МЗ. Однако из-за большого значения $\Delta\lambda$ эта структура не эффективно подавляет сигнал от линий ионов Fe XV и Fe XVI.

В качестве альтернативных структур исследуются магнийсодержащие МЗ. Магний, имеющий край поглощения $\lambda_L = 25$ нм, является одним из самых прозрачных материалов в области длин волн $\lambda > 25$ нм. Поэтому многослойные зеркала на его основе потенциально могут сочетать высокие отражение и спектральную селективность. Проблема же второго порядка отражения решается тем, что он приходится на спектральный диапазон $\lambda < 25$ нм, где Mg имеет высокое поглощение, а магнийсодержащие многослойные структуры имеют низкое отражение.

Теоретически коэффициентами отражения, достигающими 60%, обладают МЗ SiC/Mg, W₄C/Mg и Si/Mg. Экспериментально подобные зеркала изучались, например, в [40, 42, 44, 56]. И во всех случаях отмечаются два момента. Первое: значительное отличие экспериментальных данных и теоретических расчетов. Второе: отсутствие временной стабильности отражательных характеристик. В частности, по данным [44] нельзя даже сказать, какова была величина коэффициента отражения R сразу после синтеза зеркал. На момент измерения отражательные характеристики Si/Mg МЗ снизились до R=5,6 % при $\lambda/\Delta\lambda=22$, для W₄C/Mg до R=0,2 % при $\lambda/\Delta\lambda=16$. Напротив, МЗ SiC/Mg являются более устойчивыми. При начальном отражении 42–44% ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) в [56] зафиксировано снижение R до 30% за пять лет.

Проблему различия теоретических расчетов и экспериментальных данных чаще всего связывают с эффектом перемешивания материалов на границах раздела. Для противодействия подобным процессам успешно применяются барьерные слои [40, 43, 57]. До сих пор наилучшим сочетанием пикового коэффициента отражения и спектральной полосы пропускания обладала предложенная в [40] и дополнительно изученная в [58] четырехкомпонентная структура Si/W₄C/Mg/Cr. По данным [58] непосредственно после напыления это МЗ имело R=46% при $\Delta\lambda=1$ нм. Однако из-за

процессов окисления в течение года R снижался до 30% и оставался на этом уровне в течение следующих нескольких лет наблюдений.

Таким образом, методика барьерных слоев лишь частично решает проблему, связанную с деградацией отражательных характеристик со временем. В этом случае определяющим фактором выступает высокая химическая активность магния. И, в частности, его подверженность процессам окисления.

В [56, 59] проблема временной стабильности отражательных характеристик, Mg-содержащих МЗ решается путем нанесения защитного слоя, препятствующего окислению структур. Авторы исследовали покрытия из Al, Si и SiC. Нанесение защитных слоев приводит к незначительному снижению коэффициента отражения. Тем не менее, коэффициент отражения МЗ с защитным слоем после длительного хранения значительно выше, чем у незащищенной структуры.

Таким образом, существует проблема получения желаемых отражательных характеристик, сочетающих высокие коэффициент отражения, спектральную селективность и временную стабильность. Многослойные зеркала, спроектированные по классической схеме, не способны обеспечить одновременное сочетание высоких R и $\lambda/\Delta\lambda$, кроме того имеет место расхождение теоретических и экспериментальных значений этих характеристик. Для решения этих проблем требуется поиск новых подходов и новых составов.

1.3. Многослойные зеркала для проекционной литографии с рабочей длиной волны 13,5 нм

Проекционная литография с рабочей длиной волны 13,5 нм (ЭУФ-литография) на данный момент является критически важной технологией изготовления чипов в микроэлектронной промышленности. В настоящее время с помощью этой технологии осуществляется 5 нм-техпроцесс, который позволяет располагать порядка 10^{10} транзисторов на кристалле [60, 61]. Выбор длины волны 13,5 нм связан с переходом проекционной литографии на новый лазерно-плазменный источник (спектральные линии Sn) излучения. Ранее в самых передовых литографах использовались эксимерные лазеры на длинах 193 нм (ArF) и 248 нм (F₂). Переход на более короткую длину волны 13,5 нм позволил улучшить разрешение проекционной литографии. Разрешение определяется дифракционным пределом. Предельно малое расстояние (Δx) между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка будет определяться соответственно критерию Релея:

$$\Delta x = \frac{k_1 \lambda}{NA};$$
$$NA = n \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1.20)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности (зависит от когерентных свойств света, схемы облучения маски и резиста), λ – длина волны излучения, $NA < 1$ – числовая апертура объектива, n – показатель преломления, α – выходной угол раствора объектива. Из формулы (1.20) следует, что лучшее разрешение можно получить за счет увеличения числовой апертуры NA , перехода к источникам излучения с более короткой длиной волны λ и уменьшения коэффициента k_1 . Также принципиальные изменения произошли в оптических элементах схем построения литографических установок, степперов. Теперь стала использоваться оптика, способная отражать экстремальное ультрафиолетовое излучение – многослойные рентгеновские зеркала, вместо оптики, работающей на просвет. В степперах на основе многослойных структур делаются такие элементы, как конденсоры, фокусирующие рентгеновское излучение от источника, гомогенизаторы, обеспечивающие равномерное освещение маски, фильтры, используемые для выделения нужного излучения от источника,

пелликулы – ультратонкие прозрачные мембраны для защиты масок от попадания на них частиц, приводящих к появлению дефектов и сами маски. Всего в таких схемах количество отражающих элементов может достигать 11-ти [62]. Каждое многослойное зеркало отражает не 100% падающего на него излучения, и интенсивность излучения, попадающего на фоторезист, сильно меньше, чем при выходе из источника. Поэтому критически важным параметром МЗ является коэффициент отражения, как пиковый, так и интегральный. Увеличение его даже на относительно небольшую величину (1–2%) может привести к существенному повышению эффективности литографической установки, и, как следствие, увеличению количества пластин, выпускаемых в час.

Эффективность литографической установки можно связать с коэффициентом отражения многослойных зеркал: $k_{eff} \sim R^m$ (m – количество зеркал). В случае 11-зеркальной схемы, увеличение коэффициента отражения, например, с 70% всего на 2%, повысит эффективность литографической установки на ~36%. Изменение интегрального коэффициента отражения может происходить за счет увеличения спектральной ширины ($\Delta\lambda$), например, как показано на рис. 1.5. Для примера взято два многослойных зеркала с одинаковым пиковым коэффициентом отражения (70%), но с разной $\Delta\lambda$ (0,5 и 0,54 нм), сравниваются интегралы под спектральной зависимостью коэффициента отражения после прохождения излучения через 5- и 11-зеркальную схему. Таким образом, при увеличении спектральной ширины МЗ на 0,04 нм, интегральный коэффициент отражения 5- или 11-зеркальной схемы увеличится на ~9 %.

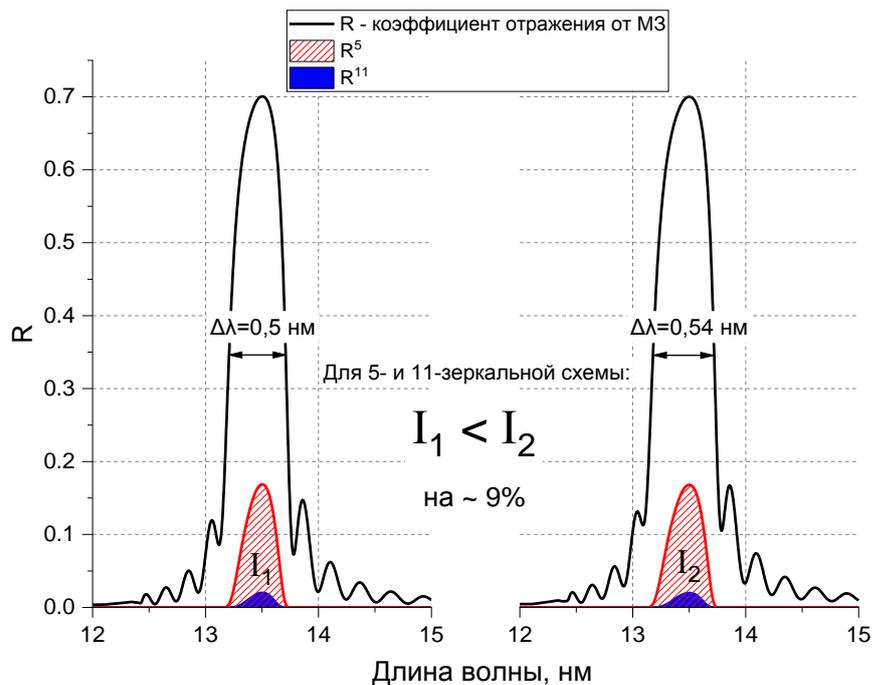


Рис. 1.5. Сравнение моделей интегрального коэффициента отражения 1-, 5- и 11-зеркальной схемы. Рассмотрены модели для двух многослойных зеркал с одинаковым пиковым коэффициентом отражения (70%) и разной спектральной шириной ($\Delta\lambda$: 0,5 и 0,54 нм).

Наилучшей парой материалов многослойного зеркала, максимально отражающего излучение с длиной волны 13,5 нм, оказались молибден и кремний. В работах, посвященных Mo/Si зеркалам, показано, что их пиковый коэффициент отражения достигает 68% при теоретическом пределе 74% [63–68]. Основной причиной отличия экспериментальных результатов от теоретического расчета является наличие протяженных переходных областей на границах раздела материалов структур. Отмечена также асимметрия переходных областей. В случае осаждения кремния на молибден (Si-на-Mo) ширина оценивается как 0,5–0,6 нм, в случае осаждения молибдена на кремний (Mo-на-Si) – как 1–1,2 нм [69].

Наиболее действенным способом увеличения коэффициентов отражения многослойных зеркал Mo/Si признана методика барьерных слоев, заключающаяся в осаждении на поверхность молибдена и/или кремния третьих материалов. Наиболее распространенные барьерные материалы – углерод и карбид бора B_4C . Главная задача – это улучшение более протяженной границы Mo-на-Si. В результате

максимальный коэффициент отражения для структур типа Mo/B₄C/Si/B₄C и Mo/Si/C составил 70,15% на длине волны 13,5 нм [70].

В [71] сообщается о сглаживании границы Mo-на-Si до 0,6 нм при внедрении в систему Mo/Si бериллия в качестве третьего материала. Порядок материалов от подложки к поверхности: молибден, бериллий, кремний (Mo/Be/Si). При этом границы Be-на-Mo и Si-на-Be также обладают небольшой протяженностью (порядка 0,3 нм). Экспериментально достигнуты коэффициенты отражения более 71% при $\lambda = 13,5$ нм и более 72% при $\lambda = 12,9$ нм.

Здесь важно отметить, что толщина наиболее прозрачного материала Be в этих экспериментах была довольно значительной – 1,5–2 нм (при общем периоде 6,9 нм). В результате уменьшения общего поглощения структуры выросла глубина экстинкции. Полуширина пика отражения составила около 0,5 нм. Для двухкомпонентной Mo/Si структуры или для Mo/Si с барьерными слоями карбида бора и углерода эта величина достигает 0,53 нм. Уменьшение ширины пика отражения является следствием применения относительно «толстого» слоя бериллия.

1.4. Короткопериодные многослойные зеркала для мягкого и жесткого рентгеновского диапазона

1.4.1. Короткопериодные многослойные зеркала для мягкого рентгеновского диапазона

Для значительной части экспериментов с использованием синхротронного излучения достаточно спектральное разрешение на уровне $\lambda/\Delta\lambda\sim 100$, а на первый план выходят высокие пиковые и интегральные коэффициенты отражения. Так же критически важной является минимизация влияния длинноволнового и коротковолнового излучения на результаты экспериментов на выбранной длине волны. В наибольшей степени этим условиям удовлетворяют многослойные рентгеновские зеркала брэгговского типа. Большие рабочие углы, существенно превосходящие критические углы полного внешнего отражения, подавляют вклады как коротковолнового, так и длинноволнового излучения в результирующий монохроматический сигнал. Многослойные зеркала так же могут эффективно подавлять высшие порядки дифракции. Четные порядки можно подавить практически до уровня нерезонансного отражения за счет выбора толщины сильно- и слабопоглощающих материалов в периоде МЗ (d) в соотношении 1:1. Отражение третьей и высших резонансных m-гармоник эффективно подавляется за счет межслоевых шероховатостей (σ), так как коэффициент отражения зависит от них следующим образом [2]:

$$R_m \sim e^{-\frac{4\pi^2 \cdot m^2 \cdot \sigma^2}{d^2}}. \quad (1.21)$$

При многократном отражении фильтрующие свойства МЗ только усиливаются, а так же повышается результирующее спектральное разрешение.

В синхротронах для выделения из сплошного спектра излучения линии с определенной длиной волны используют монохроматоры. Например, в [72] описан двухзеркальный монохроматор, который позволял исследовать спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий фотонов от 150 до 1800 эВ (0,7–8,2 нм) со спектральной селективностью $\lambda/\Delta\lambda\sim 60$ в середине рабочего диапазона. В работе использовались МЗ на основе Fe/C, изготовленные методом импульсного

лазерного напыления [73], и W/Si, изготовленные магнетронным распылением [74]. Подобные зеркала применяют в монохроматоре станции «Космос», которая с 2007 года по настоящее время функционирует на накопителе ВЭПП-4 в Институте ядерной физики СО РАН [75]. На монохроматор устанавливается одна из трех пар имеющихся многослойных зеркал, чтобы перекрыть диапазон от 80 до 2000 эВ. Как показали измерения, правильный подбор рентгеновских фильтров позволяет добиваться достаточно высокой чистоты монохроматического излучения – менее 1% примеси фотонов за пределами текущей рабочей полосы монохроматора. Однако малое количество наборов зеркал приводит к малой светосиле прибора и, как следствие, к низким потокам фотонов в реальном эксперименте. Для получения более высоких потоков фотонов следует применять определенный набор зеркал, оптимизированных каждое на свой небольшой диапазон энергий.

Современные задачи требуют: расширения рабочего диапазона, как в коротковолновую, так и длинноволновую области; увеличение спектральной селективности и коэффициентов отражения зеркал. С учетом значительного прогресса в технологии напыления многослойных зеркал за эти годы, эти проблемы могут быть успешно решены за счет увеличения числа поддиапазонов и оптимизации выбора зеркал для каждого поддиапазона.

Современный подход к выбору пар материалов МЗ, обеспечивающих одновременно максимальные пиковые значения коэффициентов отражения и высокую спектральную селективность в заданном спектральном диапазоне заключается в использовании материалов, как сильно, так и слабо поглощающих, у которых скачки поглощения находятся максимально близко к коротковолновой части рабочего диапазона [76, 77].

Наиболее проблемной является область длин волн $\lambda=2,3-3,1$ нм. В этом диапазоне 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 [78]) и V ($\lambda=2,4$ нм, МЗ Cr/V [79]). Так как диапазон очень узкий, фактически заметное отражение наблюдается только на фиксированных линиях, то в широкополосном спектрометре монохроматоре эти зеркала применяться не могут. В

области длин волн 0,683–2,3 нм, до M_V -края поглощения W ($\lambda_M=0,683$ нм), широко используются зеркала W/Si и W/B₄C [80, 81].

1.4.2. Многослойные зеркала для жесткого рентгеновского диапазона

Благодаря бурному развитию технологии напыления тонких пленок многослойные зеркала для рентгеновского диапазона нашли широкое применение в самых различных областях науки, техники и технологии. Они используются в серийных рентгеновских дифрактометрах и спектрометрах для монохроматизации, фокусировки и коллимации рентгеновского излучения [82]. Скрещенная система МЗ в геометрии Киркпатрика-Баеза обеспечивает нанофокусировку синхротронного излучения [83]. МЗ на прозрачных подложках или даже свободновисящие структуры используются в качестве светоделителей, поляризаторов, фазовращателей мягкого рентгеновского излучения и фильтров для подавления длинноволнового излучения [84–86]. В последнее время МЗ начали активно применяться для рентгеновской микроскопии [87, 88].

Одной из проблем в развитии технологии роста МЗ является уменьшение периода многослойной структуры. Известно, что наибольшее влияние на коэффициент отражения вносит длина переходной области между слоями. Длина переходной области определяется ростовыми особенностями пленок, чаще всего проявляющихся в развитии шероховатости поверхности пленок, процессами перемешивания материалов, вызванных диффузией и химическим взаимодействием материалов пленок на границах.

Эти физические процессы сильно зависят от параметров технологического процесса роста. В случае химически взаимно нейтральных материалов пленок перемешивание на границах в наибольшей степени определяется энергией атомов, конденсирующихся на поверхность. В частности, в [81, 89] показано, что снижение энергии распыляющих ионов аргона приводит к заметному уменьшению перемешивания материалов на границах и позволяет продвинуться в область меньших периодов. Для материалов слоев, которые химически взаимодействуют, может использоваться технология пассивации с ионно-стимулированным осаждением или реактивным распылением [90].

Практика показала, что количество комбинаций материалов, позволяющих получать высокие коэффициенты отражения в короткопериодных зеркалах весьма ограничен. В частности, Cr/Sc, Cr/Ti и Cr/V МЗ с периодами до 1,4–1,5 нм имеют высокие коэффициенты отражения в спектральной области окна прозрачности воды, длины волн 2,3–4,4 нм [78, 88, 91]. Однако, из-за близких значений электронной плотности этих материалов, эффект наблюдается только в узкой области аномальной дисперсии Sc и Ti, соответственно. В широком диапазоне длин волн фактически только W/B₄C МЗ имеют высокие коэффициенты отражения при периодах менее 2 нм. Как было показано в [92] эта система резко деградирует при уменьшении периода до 1,1–1,2 нм, что проявляется в резком росте межслоевой шероховатости при неизменной глубине перемешивания материалов. По-видимому, это связано с потерей сплошности пленок вольфрама.

Для ряда задач недостатком W/B₄C МЗ является его невысокая селективность, связанная с большим скачком электронной плотности между «тяжелым» W и «легким» B₄C. Повышение спектральной селективности за счет уменьшения периода и работы на больших углах скольжения приводит к сильному падению коэффициентов отражения, что особенно чувствительно в многозеркальных системах [93]. Так же 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 [94]. Поэтому поиск новых систем, обеспечивающих большие коэффициенты отражения и спектральную селективность при тех же, или даже меньших значениях периода, является крайне актуальным.

Известен подход для повышения разрешающей способности многослойных зеркал – это использование в качестве рассеивающего материала переходных металлов, а в качестве спейсера – наименее поглощающих. Наименее поглощающим материалом является бериллий. Однако короткопериодные МЗ с Be, за исключением W/Be [95, 96], свойства которых мало отличаются от W/B₄C, практически не изучались. Для решения отмеченных выше проблем перспективной системой вида (легкий металл)/Be считалась Ti/Be. Однако исследования этой системы показали

большую межслоевую шероховатость [97]. Поэтому поиск новых многослойных систем и для жесткого рентгеновского диапазона является актуальным.

1.5. Выводы по главе 1

1. В области длин волн 2–40 нм бериллий является одним из самых слабопоглощающих материалов, в качестве спейсера он может использоваться в диапазоне $\lambda < 4,4$ нм и $\lambda > 11,1$ нм. При этом для $\lambda > 17,1$ нм бериллий может использоваться в качестве рассеивающего материала в паре с рядом материалов: Si, Al, Mg.
2. Классический подход к созданию МЗ – сочетание «легкого» и «тяжелого» элементов не позволяет создавать зеркала с характеристиками, удовлетворяющими требованиям астрофизических экспериментов ближайшего будущего ($\Delta\lambda < 0,42$ нм для длины волны 17,1 нм и $\Delta\lambda < 1,2$ нм для 30,4 нм).
3. Многослойные зеркала Mo/Be/Si, обладающие наибольшим пиковым коэффициентом отражения $R=71\%$ на длине волны 13,5 нм, имеют малую спектральную ширину $\Delta\lambda=0,5$ нм относительно МЗ Mo/Si ($\Delta\lambda=0,53$ нм). Это приведет к снижению эффективности литографа с 11 зеркалами на 9%.
4. Традиционно применяемые для работ с синхротронным излучением короткопериодные МЗ W/Si и W/B₄C обладают относительно высоким пределом снижения периода без потери эффективности отражения ($d_{W/Si}=1,8$ нм, $d_{W/B_4C}=1,2$ нм). Это не позволяет расширить диапазон рабочих углов, энергий МЗ. В области «окна прозрачности воды» 2,2–4,4 нм высокие коэффициенты отражения достигаются лишь в узких спектральных областях вблизи краев поглощения элементов V L ($\lambda=2,42$ нм), Ti L ($\lambda=2,73$ нм) и Sc L ($\lambda=3,11$ нм). Сохраняется проблема создания эффективных МЗ, работающих вдали от этих спектральных линий.

Глава 2. Синтез и изучение Mo/Si зеркал с Ве и В₄С барьерными слоями для области 13,5 нм.

2.1. Аппаратура для синтеза бериллийсодержащих многослойных структур

Все многослойные зеркала, представленные в этой диссертации, были синтезированы методом магнетронного напыления в специализированной бериллиевой лаборатории ИФМ РАН. В данной лаборатории для проведения исследований в рамках диссертационной работы был осуществлен монтаж и запущена в эксплуатацию установка магнетронного напыления, фотография которой с обозначениями основных элементов и блок-схема приведены на рис. 2.1 и 2.2.

Лаборатория оснащена системами вентиляции (1), притока и оттока воздуха с трехкратным обменом в течение часа. На вентиляции, системе притока-оттока, на вытяжках установлены фильтры с несколькими степенями очистки. Системой фильтрации оснащена и откатная магистраль технологических установок. Установка состоит из: вакуумной камеры (2) объемом 400 литров с шестью магнетронами (схематически изображены на рис. 2.3); поста откачки (3), состоящего из турбомолекулярного насоса (4) производительностью 2200 л/с, форвакуумного насоса (5) производительностью 500 л/мин, системы клапанов и стойки с блоками управления (6); устройств вращения подложки, в числе которых серводвигатель (7), вращающий образец вместе с держателем относительно оси вакуумной камеры и двигатель, вращающий образец относительно оси держателя образца (схематически изображен на рис. 2.3); стойки (8) с блоками питания магнетронов, управления серводвигателем и главным контроллером; рабочего места оператора (9) с системой управления процессом, установленной на персональном компьютере; систем подачи газа аргона из баллонов через систему очистки газа (от влаги и кислорода) (10) с использованием двух независимых устройств, контролирующих давление рабочего газа: магнитострикционного натекавателя газа (11) и регулятора расхода газа РРГ-12 производства «Элточприбор» (12).



Рис. 2.1. Фотография установки магнетронного напыления в двух видах.

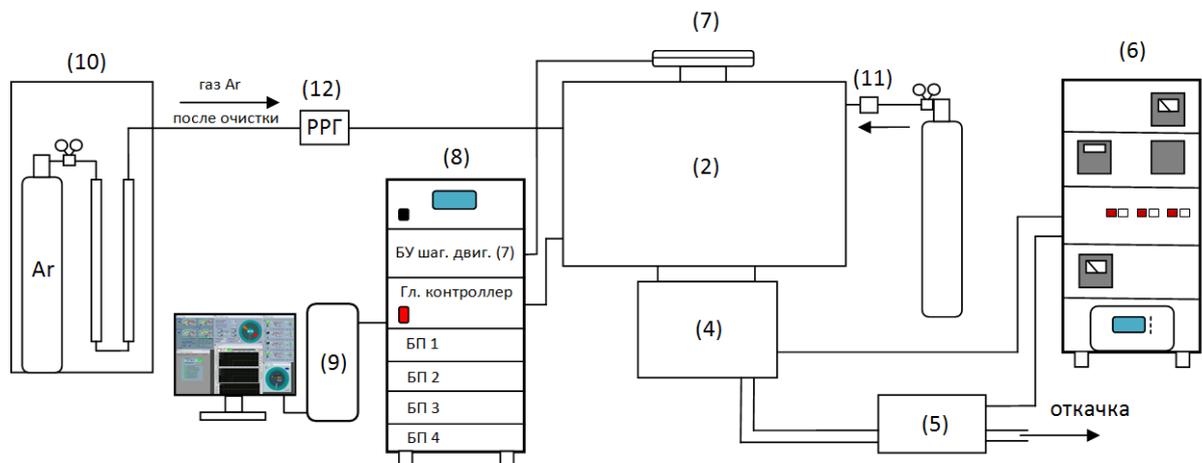


Рис. 2.2. Блок-схема с основными элементами установки магнетронного напыления.

На рис. 2.3. приведена схема вакуумной камеры магнетронной установки. Внутри вакуумной камеры расположены шесть магнетронов 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. Источниками питания магнетронов служат стабилизированные блоки на постоянном токе, разработанные в ИФМ РАН. Они позволяют варьировать ток разряда в пределах 100–2000 мА со стабилизацией на уровне сотых долей процента при напряжениях от 100 до 800 В.

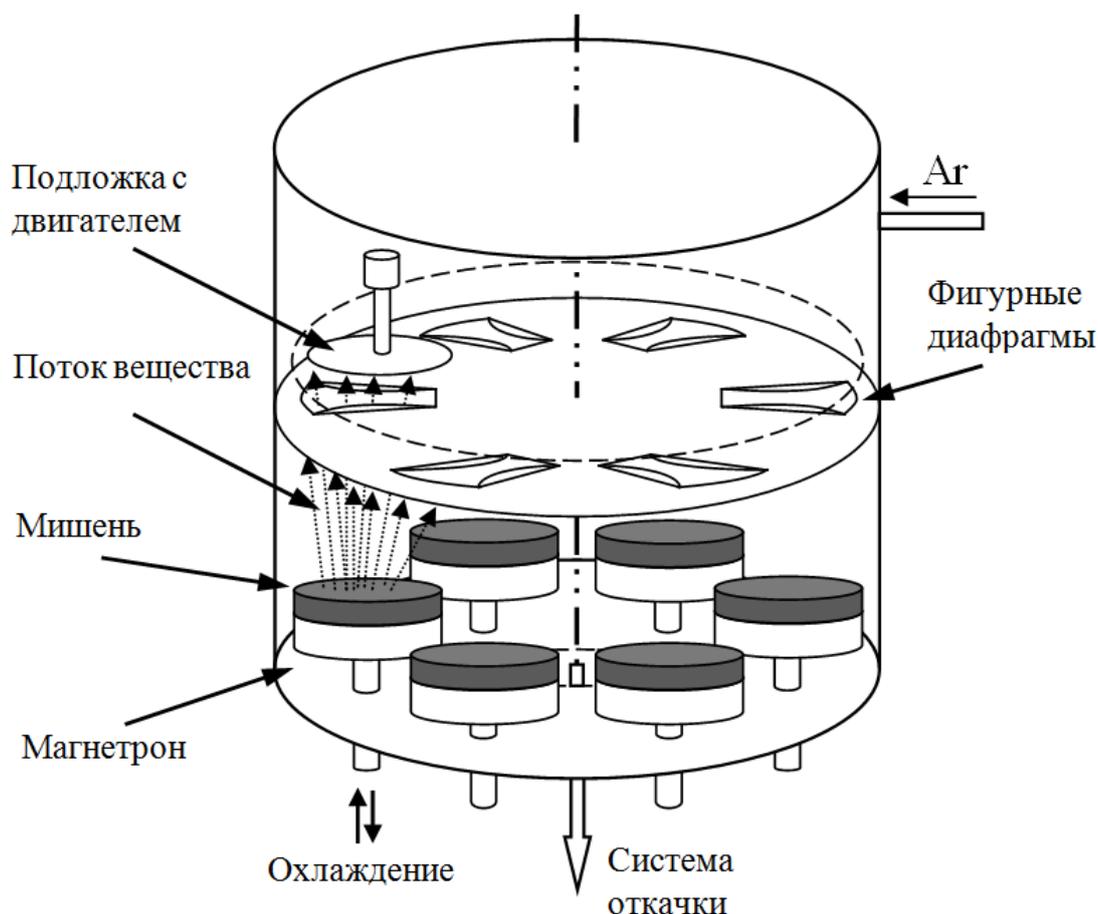


Рис. 2.3. Схема вакуумной камеры с 6-ю магнетронами и процесса синтеза зеркала.

В ходе процесса синтеза подложка крепится на вращающемся диске, расположенном над магнетронами. Оптимальным расстоянием мишень-подложка является 75-80 мм (приблизительно соответствует длине свободного пробега частиц при рабочих давлениях Ar около 0,1 Па). При меньших расстояниях подложка может попасть в область магнетронного разряда. При больших расстояниях падает скорость роста пленок. Подложка последовательно проходит над работающими

магнетронами. Толщины пленок контролируются током разряда и временем нахождения подложки над 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 менее 0,5% от величины периода.

Критически важным для получения качественного периодического покрытия является стабилизация всех параметров процесса на уровне 0,1–0,3%. Решение задачи стабилизации достигается путем использования программно-аппаратного комплекса на базе РС-совместимого промышленного контроллера i-8431. Контроль и протоколирование параметров процесса напыления осуществляется с помощью персонального компьютера.

Интерфейс программы управления, созданный в ИФМ РАН в рабочей среде LabVIEW и протокол технологического процесса приведены на рис. 2.4.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	11.09.2022			PR-714								sub/ [Y/Cr]x20 / [Mo/Si]x50
2												
3	I (Y) = 400 mA;		S (Y) = 0.531									Подложка:
4	I (Cr) = 400 mA;		S (Cr) = 0.697									Сфера M1 #2
5	I (Mo) = 600 mA;		S (Mo) = 0.601									Надо:
6	I (Si) = 600 mA;		S (Si) = 0.462									$\lambda = 135.3 \text{ \AA}$
7												
8	N (Y/Cr) = 20; N (Mo/Si) = 50											
9												
10												
11	V (Y), В =	241	236.3	236.2	-	-	-	-	-	-	-	-
12	V (Cr), В =	263	256.4	256.8	-	-	-	-	-	-	-	-
13	V (Mo), В =	-	-	-	239.6	240.8	240.4	240.8	240.8	240.8	240.8	240.8
14	V (Si), В =	-	-	-	273.2	272.8	272.8	272.8	272.4	273.2	273.6	272.4
15	I_нат, mA =	25.2	25.93	26.42	26.5	26.8	26.82	26.87	26.9	26.96	26.98	26.98
16	P_рв, x10^3 =	2.16	2.29	2.26	2.25	2.27	2.26	2.26	2.25	2.25	2.25	2.25
17	t =	7:53	8:13	8:49	9:00	10:23	10:31	10:52	11:12	11:42	12:04	12:04
18	Цикл =	-	1	20	-	1	5	15	25	40	50	50
19	P_нат x10^3 =	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
20		Y/Cr			Mo/Si							
21												

Рис. 2.4. Пример окна программы управления процессом магнетронного напыления и протокола технологического процесса.

После синтеза основные параметры многослойных зеркал, такие как период, толщины индивидуальных слоев, межслоевые шероховатости, определялись с помощью основных методов исследования многослойных зеркал, описанных ниже.

2.2. Методы исследования структурных параметров и отражательных характеристик МЗ

Измерения методом малоугловой рентгеновской рефлектометрии проводились на четырехкристальном высокоразрешающем дифрактометре PANalytical X'Pert Pro ($\lambda = 0,154 \text{ нм}$). Этот прибор позволяет производить исследования кристаллических материалов и искусственных многослойных систем методом дифракции рентгеновских лучей, в том числе — малоугловой. Внешний вид

и основные элементы дифрактометра изображены на рис. 2.5 и 2.6. По центру расположен столик для крепления образца (1), который установлен на гониометре с 6-ю степенями свободы, позволяющем изучать локально по всей поверхности как плоские, так и изогнутые образцы. Справа располагается рентгеновская трубка (2) – источник рентгеновского излучения с длиной волны $\text{Cu K}\alpha$ 0.154 нм (максимальное напряжение: 60 кВ, ток: 60 мА). Спектральная и угловая монохроматизация зондового пучка осуществляется с помощью четырехкристального монохроматора Ge (220) (3). На выходе монохроматора установлены щели (4), ограничивающие пучок в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Слева находится газовый пропорциональный детектор (5). Перед детектором установлен держатель с коллиматором Соллера (6), ограничивающим вертикальную расходимость пучка и входная щель (7).



Рис. 2.5. Внешний вид дифрактометра Panalytical X'Pert PRO.

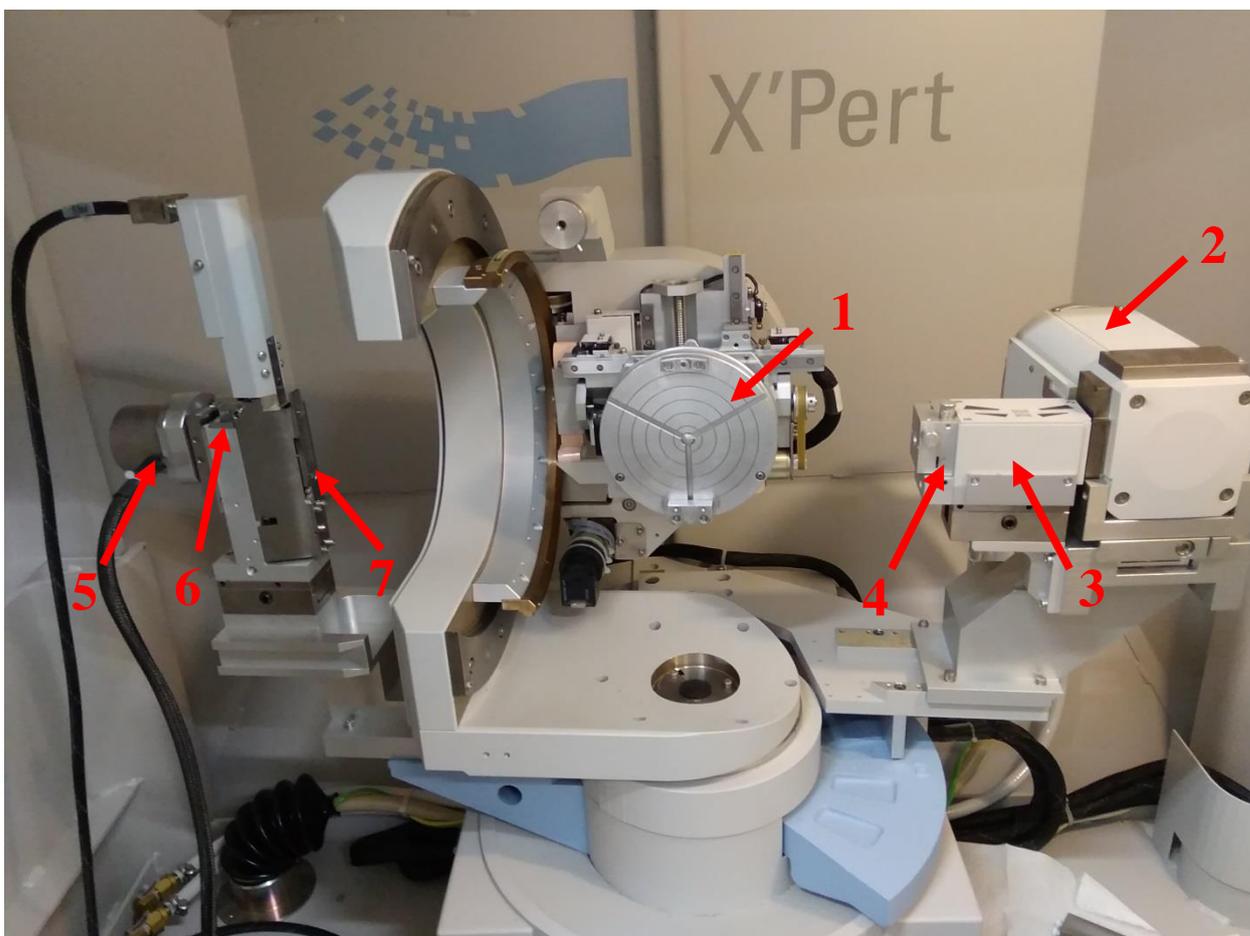


Рис. 2.6. Внутреннее устройство дифрактометра PANalytical X'Pert Pro.

Комплексы Philips X'Pert в нашем институте в основном используются для изучения малоуглового рассеяния жесткого рентгеновского излучения. Этот метод является одним из наиболее развитых и востребованных на практике способов неразрушающего контроля внутреннего строения кристаллов и поликристаллических веществ, многослойных структур, микрошероховатости поверхностей и других физических объектов. Малая длина волны, сравнимая с межатомными расстояниями, обуславливает чувствительность метода к атомному строению материалов. Несмотря на низкую рассеивающую способность атомами излучения в этом спектральном диапазоне, интерференция рентгеновских лучей в большинстве случаев приводит к резонансному увеличению интенсивности рассеянного (отраженного) излучения, тем самым, обеспечивая исследователей надежной информацией о структурных и иных свойствах изучаемых объектов. Кроме того, из-за низкого поглощения и рассеяния излучения в воздухе, большинство экспериментов проводится на воздухе (без использования вакуумного

оборудования), что существенно уменьшает время подготовки и проведения эксперимента. В таблице 2.1 приведены технические характеристики дифрактометра.

Таблица 2.1. Технические характеристики четырехкристального дифрактометра Panalitical X'Pert PRO.

	Диапазон	Точность
Горизонтальная расходимость пучка, °	< 0,0053	–
Вертикальная расходимость пучка, °	1,15	–
Горизонтальная расходимость регистрируемого пучка, °	0,008-0,54	–
Вертикальная расходимость регистрируемого пучка, °	1,15	–
Угловое сканирование образца Θ , °	-4,75 – +81,50	лучше 0,001
Угловое сканирование детектора 2Θ , °	-9,50 – +163,0	лучше 0,001
Вращение образца Φ , °	360	0,01
Наклон образца Ψ , °	180 (± 90)	0,01
Сканирование по X, мм	100	0,01
Сканирование по Y, мм	100	0,01
Сканирование по Z, мм	11	0,001
Максимальный размер образца, мм	100×100×24	–
Максимальный вес образца, кг	0,5	–

Данный дифрактометр в основном использовался для изучения малоуглового рассеяния жесткого рентгеновского излучения от образцов, представляющих собой либо пленки из одного материала, либо многослойные зеркала, имеющие от 2-х до 4-х различных материалов в периоде. При этом результатом измерения является угловая зависимость коэффициента отражения. Примеры таких зависимостей от пленки и от зеркала показаны на рис. 2.7.

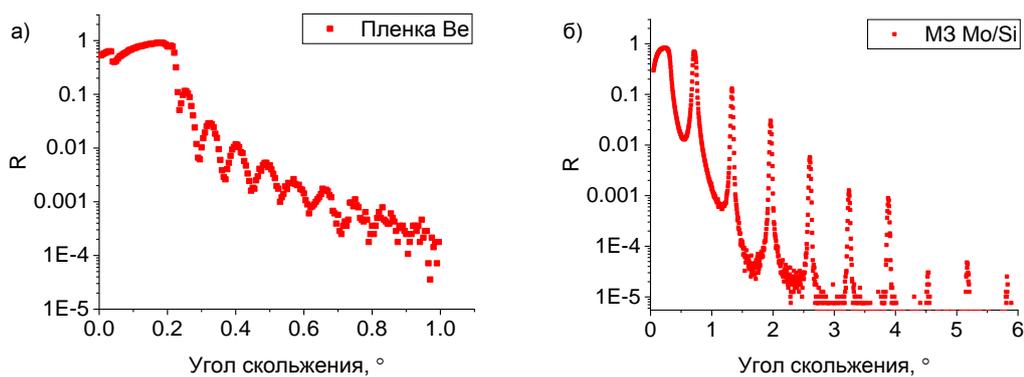


Рис. 2.7. Примеры измеренных на дифрактометре PANalytical X'Pert Pro угловых зависимостей коэффициента отражения для пленки Ве (а) и многослойного зеркала Mo/Si (б).

Кроме изучения малоуглового рассеяния жесткого рентгеновского излучения, дифрактометр позволяет получать кривые диффузного рассеяния. Один из типов измерения диффузного рассеяния заключается в том, чтобы выбрать положение гониометра образца и детектора, соответствующие первому брегговскому порядку дифракции. Затем выполняется сканирование детектором (2θ -скан) при неизменном положении образца, либо сканирование образцом (θ -скан) при фиксированном положении детектора. Схематическое расположение рентгеновской трубки, образца и детектора в процессе измерения на дифрактометре PANalytical X'Pert Pro изображено на рис. 2.8. Рентгеновская трубка с монохроматором (М) остается неподвижной, двигаются только образец и детектор (обозначено стрелками). Используя совокупность методов малоугловой рентгеновской рефлектометрии и диффузного рассеяния, а также численное моделирование, возможно разделение вкладов рассеивающей шероховатости и перемешивания материалов в общую переходную область между слоями в МЗ. Примеры кривых качания образцов (θ -скан) для МЗ Cr/Ве с периодами 2,2 нм (а) и 0,8 нм (б), измеренных на дифрактометре PANalytical X'Pert Pro показаны на рис. 2.9. Рабочие параметры рентгеновской трубки были следующие: напряжение $U=30$ кВ, ток электронного пучка $I=20$ мА. Приёмная щель детектора составляла 0.3 мм.

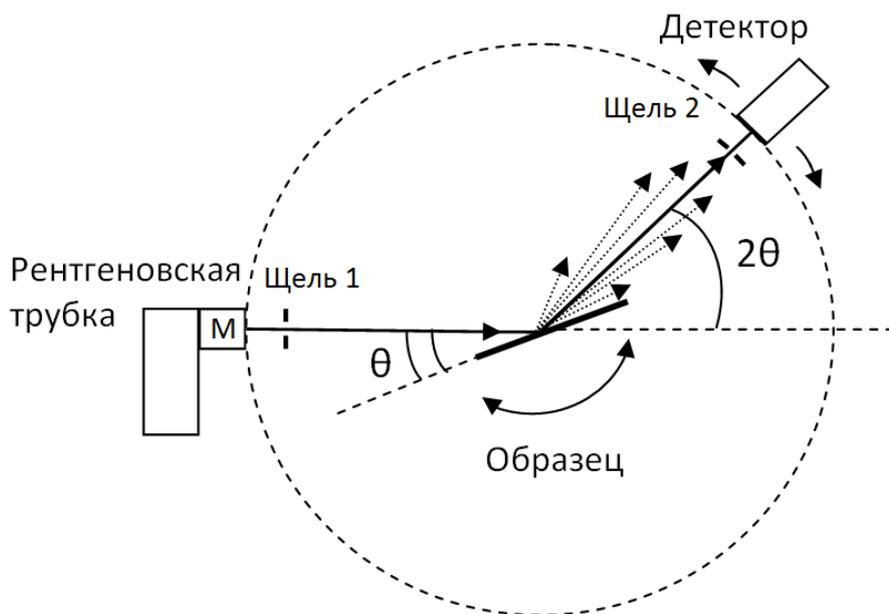


Рис. 2.8. Схематическое расположение основных элементов дифрактометра в процессе измерения диффузного рассеяния: после выставления геометрии θ - 2θ , изменяется положение (стрелки) образца или детектора в зависимости от типа измерения (θ -скан или 2θ -скан, соответственно).

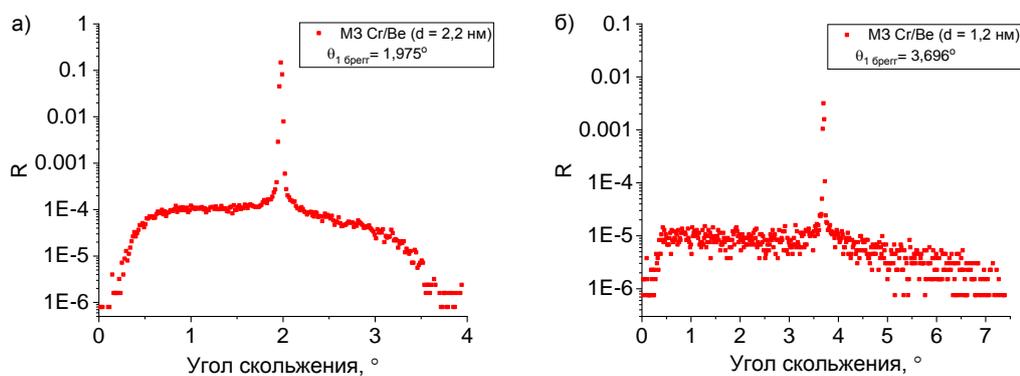


Рис. 2.9. Примеры кривых качания образцов (θ -скан), измеренных на дифрактометре PANalytical X'Pert Pro. Зеркальное положение для каждого образца соответствует первому брэгговскому пику.

В лаборатории измерения в области мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн проводились на: 1) рефлектометре с монохроматором РСМ-500 [98]; 2) рефлектометре с двумя монохроматорами

(PCM-500 и ЛНТ-30), которые соединены с одной камерой гониометра [99]; 3) рефлектометре со спектрометром Черни-Тюрнера и широкополосным лазерно-плазменным источником, позволяющим проводить измерения в диапазоне 5–50 нм [100].

Первый рефлектометр из указанных выше разработан в ИФМ РАН для оперативного контроля рентгенооптических элементов произвольной формы. Источником излучения является разборная рентгеновская трубка со сменными анодами, что позволяет оперативно переключаться между длинами волн. Монохроматизация излучения производится с помощью решеточного спектрометра-монохроматора РСМ-500, обеспечивающего спектральное разрешение в ЭУФ диапазоне $\lambda/\delta\lambda \approx 380$. Пятиосный гониометр позволяет изучать образцы неплоской формы. Максимальный размер исследуемых образцов может достигать 300 мм в диаметре. Схема рентгеновской трубки с набором мишеней приведена на рис. 2.10, внешний вид рефлектометра и гониометра показан на рис. 2.11. Примеры измеренных угловых зависимостей коэффициента отражения можно увидеть в главе 4. Измерялось многослойное зеркало W/Be на длинах волн 0,989 нм (в качестве анода использовалась мишень Mg), 1,759 нм (Fe) и 3,14 нм (Ti).

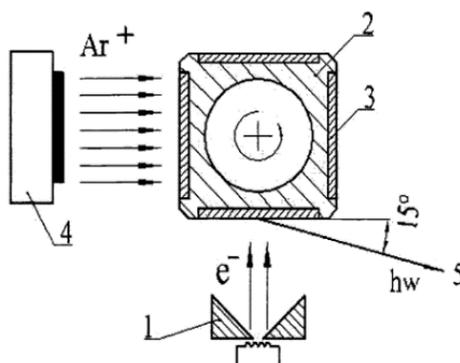


Рис. 2.10. Схема рентгеновской трубки с 4 мишенями. 1 – электронная пушка, 2 – водоохлаждаемый держатель мишеней, 3 – мишени, 4 – ионная пушка, 5 – рентгеновское излучение.

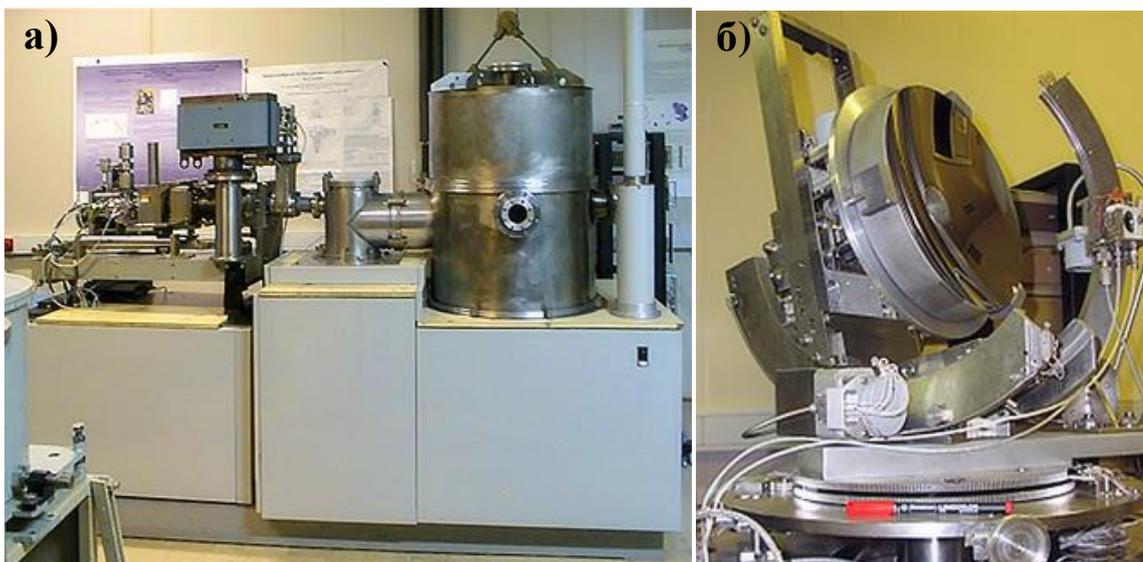


Рис. 2.11. Внешний вид рефлектометра (а) и пятиосный гониометр, расположенный в камере рефлектометра (б).

Второй лабораторный рефлектометр, на котором происходила аттестация образцов, построен на базе двух монохроматоров РСМ-500 и ЛНТ-30. Камеры с данными монохроматорами формируют два разных плеча установки, каждый из которых используется для своего спектрального диапазона. Суммарно рефлектометр обеспечивает излучение в широком спектральном диапазоне 4–200 нм. Оба плеча соединены с центральной камерой, в которой расположен гониометр. Схема установки представлена на рис. 2.12. В первом плече, в котором расположен монохроматор РСМ-500, источником излучения является рентгеновская трубка со сменными анодами. Сам монохроматор построен по роуландовской рентгенооптической схеме со сферической дифракционной решеткой и позволяет аттестовывать образцы в диапазоне 4–25 нм. В частности, использование мишеней кремния и алюминия в рентгеновской трубке позволяет измерять зеркала на $\lambda=13,5$ нм и 17,1 нм, соответственно. В плече с монохроматором ЛНТ-30 в качестве источника используется газоразрядная трубка. В ЛНТ-30 в качестве дисперсионного элемента используется тороидальная дифракционная решетка. Спектральный диапазон данного прибора 30–200 нм. В качестве рабочих газов используются водород, гелий, азот, кислород, аргон. Например, используя гелий, можно измерять угловые зависимости коэффициентов отражения образцов на спектральной линии 30,4 нм. Таким образом, данная установка позволяет производить измерение

образцов как в МР, так и в ВУФ диапазонах, не меняя дифракционной решетки или принципиальной схемы монохроматоров.

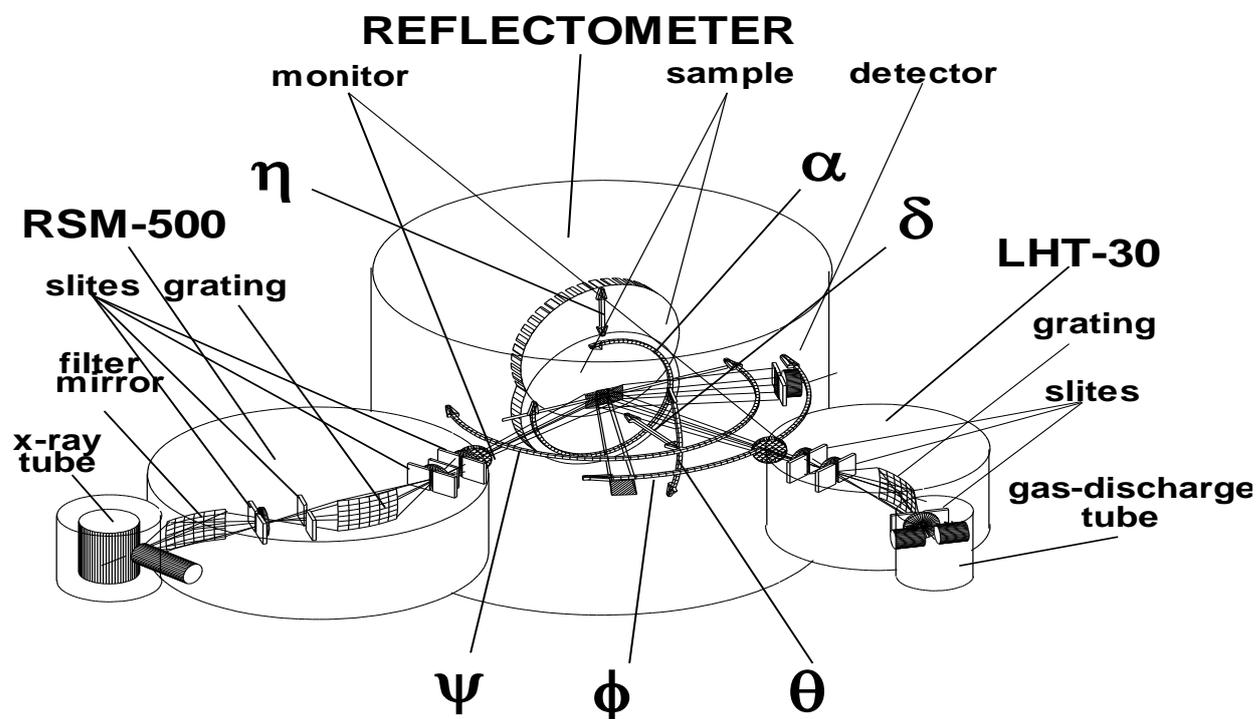


Рис. 2.12. Оптическая схема рефлектометра для МР и ВУФ диапазонов длин волн.

Рисунок взят из [99].

Гониометр имеет шесть степеней свободы (изменяемые параметры α , δ , η , θ , ϕ , и ψ на рис. 2.12) и позволяет производить измерения достаточно массивных образцов (плоских, сферических, асферических) с максимальным диаметром 300 мм. На рис. 2.13 схематично изображен гониометр, позволяющий выполнять универсальные измерения.

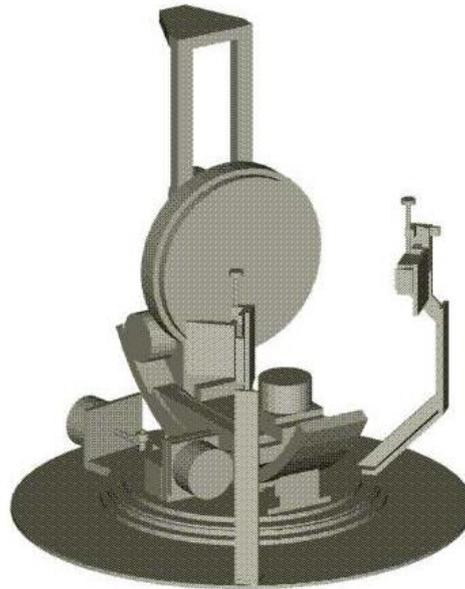


Рис. 2.13. Гониометр рефлектометра с двумя монохроматорами РСМ-500 и ЛНТ-30. Рисунок взят из [99].

В качестве приемника излучения при измерении фильтров и многослойных зеркал используется фотокатод из CsI, пригодный для исследований во всем диапазоне. Для регистрации фотоэлектронов используются вторично-электронные умножители типа ВЭУ-6. На входных пучках обоих каналов установлены мониторные приемники излучения с сетчатыми фотокатодами для контроля входной интенсивности пучков. Все камеры рефлектометра непрерывно откачиваются вакуумной системой, которая обеспечивает вакуум необходимый для распространения излучения без поглощения, а также и более высокие требования к вакууму необходимые для устойчивой работы вторично-электронных умножителей и рентгеновской трубки. Конструкция рефлектометра позволяет производить замену тестируемых объектов и юстировочные манипуляции без нарушения вакуума непосредственно на рентгеновском пучке. Все механизмы рефлектометра приводятся в движение 8-ю шаговыми двигателями.

Следующий рефлектометр со спектрометром Черни-Тюрнера предназначен для работы в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах. Высокое спектральное разрешение до 0,028 нм в широком спектральном диапазоне достигается благодаря монохроматору по схеме Черни-Тюрнера. Лазерная плазма, генерируемая путем облучения твердотельной мишени сфокусированным

лазерным излучением (длина волны 1,06 мкм, энергия импульса 0,5 Дж, длительность 4 нс, частота следования импульсов 10 Гц), используется в качестве источника излучения МР и ЭУФ диапазона. Гониометр позволяет исследовать изогнутые оптические элементы с апертурой до $NA = 0,5$ и диаметром до 500 мм. Фотография и схема рефлектометра показаны на рис. 2.14 и 2.15, соответственно. Основными системами устройства являются: лазерно-плазменный источник мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения; спектрометр/монохроматор Черни-Тернера (СМЧТ) с плоской дифракционной решеткой (ПДР); система формирования зондирующего пучка (СФЗП); гониометра (Г); системы вакуумной откачки и автоматизации процессов управления. В таблице 2.2 отражены основные технические данные измерительной установки.



Рис. 2.14. Внешний вид рефлектометра с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера.

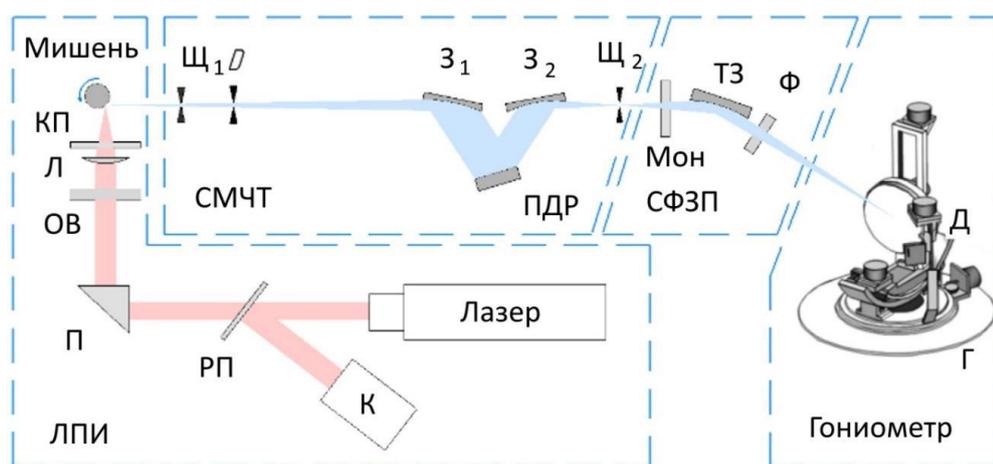


Рис. 2.15. Рентгеновская оптическая схема рефлектометра: К - термоэлектрический калориметр; РП - светоделитель; П-призма; ОВ-оптический ввод; Л - линза; КП - кварцевая пластина; Щ1 - входная щель; Д - апертура; З1, З2 - зеркала; ПДР – плоская дифракционная решетка; Щ2 - выходная щель; Мон - монитор; ТЗ - тороидальное зеркало; Ф - абсорбционный фильтр; Г – гониометр, Д - детектор.

Таблица 2.2. Технические характеристики рефлектометра с лазерно-плазменным источником и монохроматором Черни-Тернера.

Область анализируемых длин волн, нм	5–50
Разрешающая способность, нм	не хуже 0,03
Источник излучения	Лазерно-плазменный
Детектор излучения ВЭУ	шеvronная сборка микроканальных пластин (МКП) с фотокатодом CsI
Толщина слоя CsI (нм)	100
Давление в объеме камеры монохроматора, мм рт. ст.	Не хуже $1 \cdot 10^{-6}$
Давление в объеме камеры гониометра, мм рт. ст.	Не хуже $1 \cdot 10^{-6}$
Источник лазерного излучения	Nd:YAG-лазер Expla NL-300, длина волны 1,06 мкм, энергия импульса 0,5 Дж, длительность импульсов 4 нс, частота следования импульсов 10 Гц

Измерения на целевых длинах волн также проводились на рефлектометре, расположенном на оптической линии синхротрона BESSY-II [101]. Рефлектометр располагается в конце канала вывода излучения Optics Beamline и разработан специально для метрологии оптических элементов МР и ЭУФ диапазона на рабочих длинах волн. Диапазон доступных длин волн 0,62–124 нм (10–2000 эВ). Монохроматизация пучка осуществляется монохроматором SX-700 со сменной плоской решеткой (можно переключаться между двумя установленными решетками). Спектральное разрешение $E/\Delta E=2000-5000$, точность установления длины волны – 0,02%, спектральные примеси составляют менее 0,01%. Возможно изменение поляризации от линейной до эллиптической. Калибровка энергетической шкалы производится по краям поглощения тонкоплёночных фильтров и по линиям поглощения газов. Схема канала представлена на рис. 2.16.

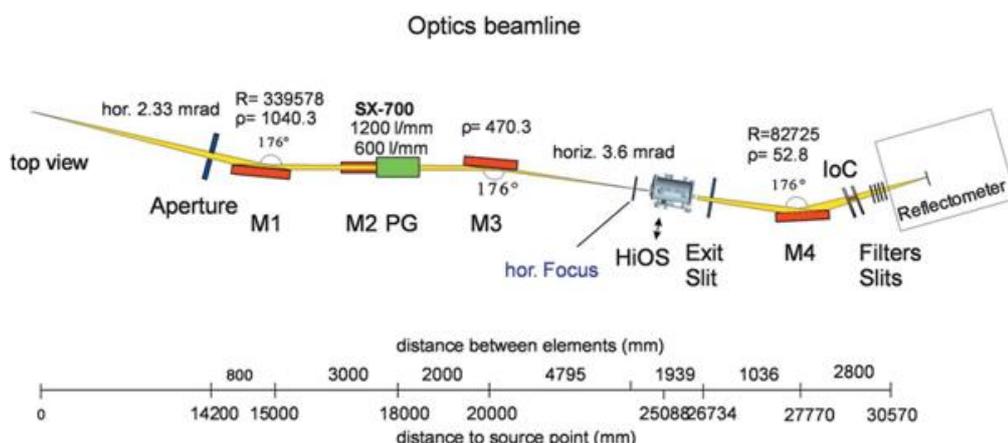


Рис. 2.16. Схема канала Optics Beamline синхротрона BESSY-II.

M1 – тороидальное зеркало вертикальной коллимации и горизонтальной фокусировки, M2 – плоское зеркало монохроматора SX-700, PG – плоская дифракционная решетка, M3 – цилиндрическое зеркало вертикальной фокусировки, HiOS – четырехзеркальный подавитель высоких порядков, Exit slit – щель 0–2000 мкм, M4 – тороидальное зеркало, перефокусирующее пучок на образец в камере рефлектометра, IoC – ионизационная камера, Filters slits – наборы тонкоплёночных фильтров.

Рефлектометр оснащен 11-осевым гониометром, точность выставления угла – 0,02°. Размер зондирующего пучка – 0,6×0,25 мм (ширина×высота). Размер

полупроводникового детектора 4×4 мм – достаточно, чтобы принять все зеркально отраженное излучение и большую часть рассеянного. Фотография рефлектометра представлена на рис. 2.17.

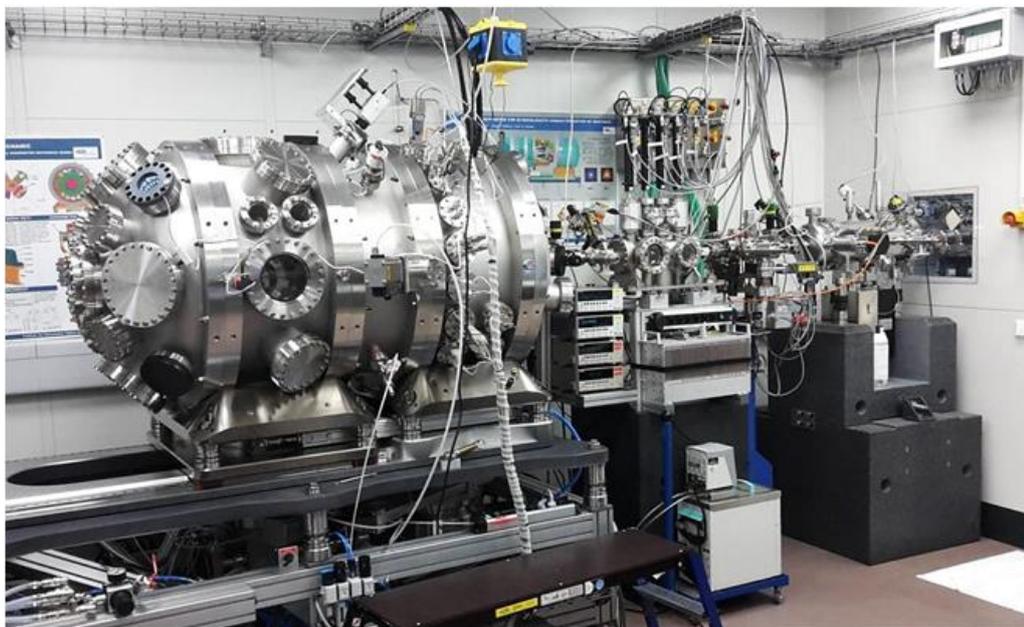


Рис. 2.17. Рефлектометр канала Optics Beamline синхротрона BESSY-II.

С помощью описанных выше рефлектометров, были измерены как угловые (при фиксированной энергии фотонов), так и спектральные (при фиксированном угле падения излучения) зависимости коэффициентов отражения (R) МЗ. Параметры многослойных зеркал 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 [102]. Пример подгонки результатов измерений зеркала Mo/Be/Si/B₄C приведен на рис. 2.18. Оптические константы материалов (δ и γ из формулы (1.1)) были взяты из [4]. Отдельно оптические константы Be были определены для диапазона энергий фотонов $20,4$ – 250 эВ [A11] по данным, полученным на синхротроне BESSY-II в ходе измерения коэффициента пропускания свободновисящих пленок Be толщиной 70 нм и 152 нм, а также рефлектометрических измерений аналогичных пленок на подложке.

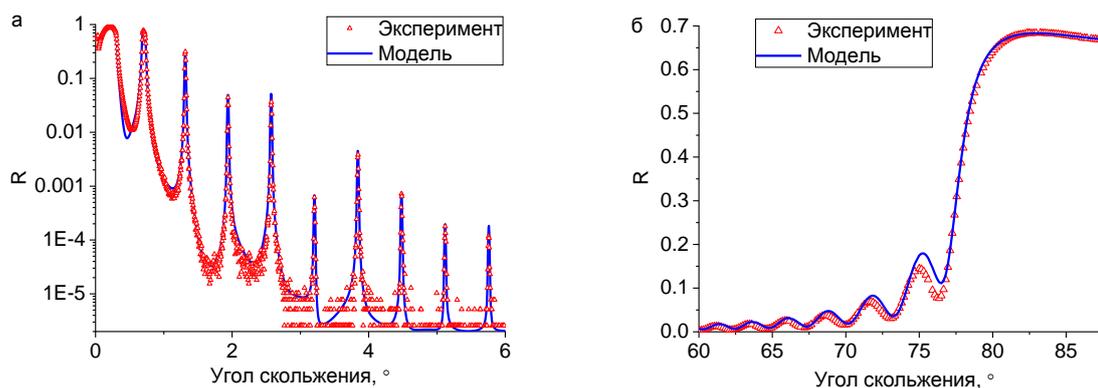


Рис. 2.18. Пример одновременной подгонки результатов измерений зеркала Mo/Be/Si/B₄C, выполненной по данным малоугловой (а) и высокоугловой (б) рефлектометрии. Символы – экспериментальные данные, сплошные кривые – результат моделирования.

Нетрудно заметить хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых одновременно на длинах волн 0,154 нм (рис. 2.18а) и 13,5 нм (рис. 2.18б). На рисунках символам отвечают экспериментальные данные дифрактометра PANalytical X'Pert Pro и рефлектометра на оптической линии BESSY-II. Сплошные кривые – результат моделирования (подгонки параметров модельной структуры).

2.3. Влияние барьерных слоев Be и B₄C на отражательные характеристики Mo/Si

Важным выводом из рассмотренных в п.1.3 работ является следующее утверждение. Сглаживание наиболее проблемной границы Mo-на-Si происходит при осаждении B₄C и C на поверхность кремния. В случае нанесения относительно толстых пленок Be, 1,5–2 нм, на границу Si-на-Mo так же наблюдался эффект сглаживания [71]. Однако, при этом из-за меньшего поглощения в слоях Be по сравнению с Si увеличилась длина экстинкции и, как следствие, возросла селективность. Для литографических применений этот эффект носит негативный характер.

Для решения этой проблемы в рамках диссертационной работы были изучены Mo/Si с «тонкими» прослойками Be на границе Si-на-Mo и B₄C на противоположных границах.

Для этих экспериментов были синтезированы многослойные структуры трех типов: Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C. Схематически порядок материалов для двух периодов в зеркалах показан на рис. 2.19.

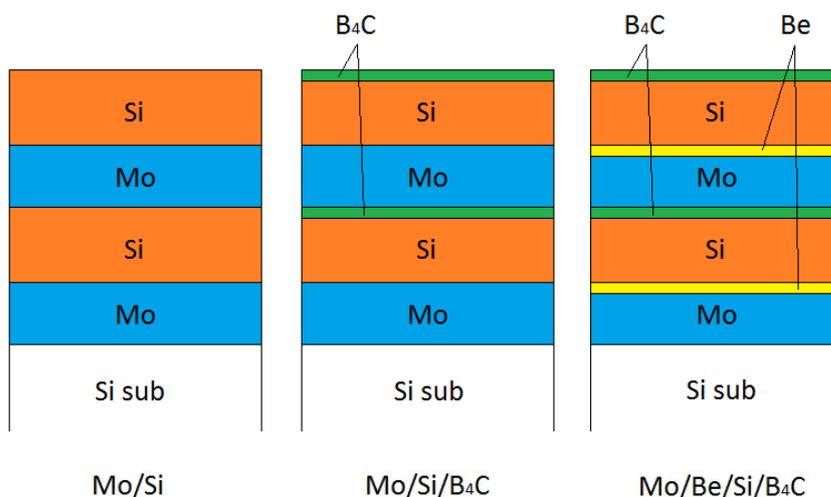


Рис. 2.19. Типы синтезированных многослойных структур.

Общее число периодов каждого типа зеркал равно 50. Эта величина заведомо превосходит так называемое $N_{эфф}=\lambda/\Delta\lambda$, которое для МЗ Mo/Si, оптимизированных на максимум R, не превосходит 30. На рисунке Si sub означает кремниевую подложку (от английского Si substrate). Толщины прослоек B₄C и Be – «барьерные», то есть малые, в единицы ангстрем, толщины Mo и Si «оптически значимые», порядка нескольких нанометров. Первым материалом на подложке во всех случаях был Mo.

Важно отметить, что для всех образцов фиксировались толщина слоя молибдена $d_{Mo}=2,75$ нм и общий период d около 6,9 нм. Для сохранения периода добавление барьерных слоев осуществлялось за счет уменьшения толщины Si. Таким образом, сохранялась величина $\beta=d_{Mo}/d$ (доля слоя молибдена в периоде структуры). Это позволяло пренебречь изменением высот дифракционных пиков за счет интерференционного эффекта. Все изменения в этих высотах можно отнести на счет изменения величины межслоевой шероховатости.

В соответствии с выражением (1.21) степень влияния шероховатости на величину пика отражения возрастает с порядком дифракции. Поэтому малые изменения шероховатости наиболее наглядно проявляются в высоких порядках дифракции (пики отражения с большими номерами). На рис. 2.20 приведены данные малоугловой рентгеновской рефлектометрии ($\lambda=0,154$ нм) для всех трех типов исследуемых структур: Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C. Для наглядности здесь выделена область углов скольжения излучения 4,4–6 градусов, то есть область 7-го, 8-го и 9-го дифракционных порядков. Для них наиболее ярко проявляется эффект шероховатости.

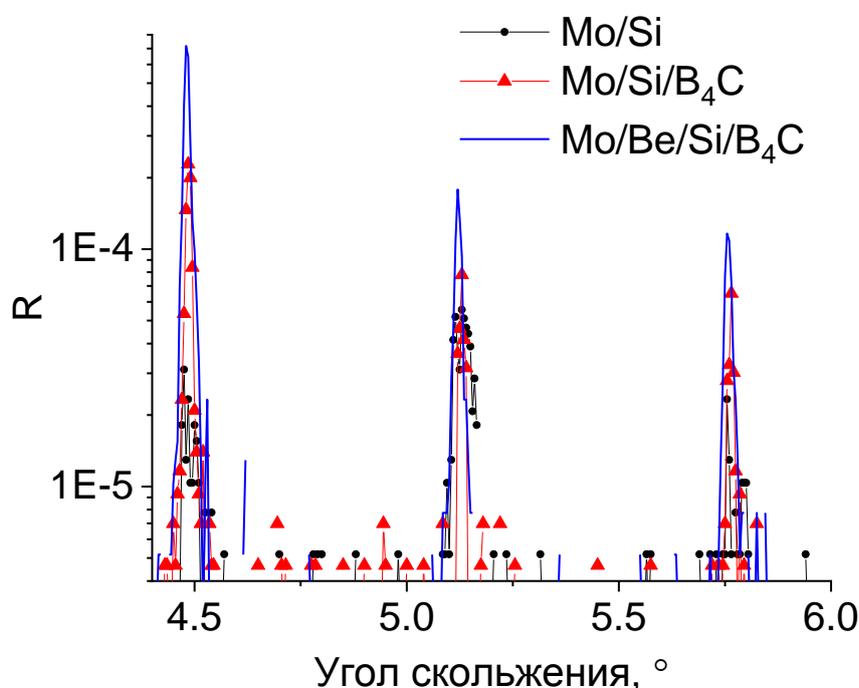


Рис. 2.20. Угловые зависимости коэффициентов отражения, измеренные в окрестности 7-го, 8-го и 9-го брэгговских пиков, зеркал Mo/Si (круглые символы), Mo/Si/B₄C (треугольные символы) и Mo/Be/Si/B₄C (сплошная кривая), длина волны 0,154 нм.

Шкала R приведена в логарифмическом масштабе. Хорошо видно, что наибольшими являются высоты пиков четырехкомпонентной структуры Mo/Be/Si/B₄C. В частности, 7-й порядок дифракции достигает значения $7,2 \cdot 10^{-4}$. Следующие по высоте трехкомпонентной структуры Mo/Si/B₄C (7-й порядок $2,3 \cdot 10^{-4}$

4). Самые низкие у двухкомпонентного зеркала Mo/Si (7-й порядок $3,1 \cdot 10^{-5}$). Это служит косвенным свидетельством в пользу наибольшей протяженности переходных областей у Mo/Si и наименьшей у Mo/Be/Si/B₄C.

По результатам обработки данных измерений, полученных с помощью метода малоугловой рентгеновской рефлектометрии, определены основные структурные параметры многослойных зеркал, их значения представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Основные структурные параметры исследуемых образцов ($\langle h(M) \rangle$ – средняя толщина пленки материала M: Mo, Si, Be, B₄C; σ – протяженность соответствующей переходной области).

Структура	$\langle d \rangle$, нм	$\langle h(M) \rangle$, нм	σ , нм
Mo/Si	6,9	h(Si)=4,15 h(Mo)=2,75	$\sigma(\text{Mo-на-Si})=0,9$ $\sigma(\text{Si-на-Mo})=0,45$
Mo/Si/B ₄ C	6,91	h(B ₄ C)=0,42 h(Si)=3,74 h(Mo)=2,75	$\sigma(\text{Mo-на-B}_4\text{C})=0,3$ $\sigma(\text{B}_4\text{C-на-Si})=0,4$ $\sigma(\text{Si-на-Mo})=0,41$
Mo/Be/Si/B ₄ C	6,92	h(B ₄ C)=0,42 h(Si)=2,88 h(Be)=0,87 h(Mo)=2,75	$\sigma(\text{Mo-на-B}_4\text{C})=0,3$ $\sigma(\text{B}_4\text{C-на-Si})=0,35$ $\sigma(\text{Si-на-Be})=0,28$ $\sigma(\text{Be-на-Mo})=0,20$

При сравнении структурных параметров для всех типов зеркал так же видна общая закономерность: σ в случае многослойных зеркал с барьерными слоями заметно меньше, чем в случае двухкомпонентной структуры Mo/Si. Это говорит о большей резкости межслоевых границ многослойных зеркал с барьерными слоями, и у Mo/Be/Si/B₄C эти границы оказываются наиболее резкими.

В результате многослойные зеркала Mo/Be/Si/B₄C имеют большее отражение в окрестности длины волны 13,5 нм [A2, A5]. Измеренные отражательные характеристики трех типов зеркал приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Отражательные характеристики исследуемых образцов ($\Delta\lambda$ – ширина на половине высоты спектральной зависимости коэффициента отражения).

Структура	$\theta, ^\circ$	$\lambda, \text{нм}$	$\Delta\lambda, \text{нм}$	R, %
Mo/Si	85	13,45	0,505	66,5
Mo/Si/B ₄ C	83	13,45	0,52	67,1
Mo/Be/Si/B ₄ C	83	13,45	0,535	68,4

На рис. 2.21 приведены экспериментально полученные спектральные зависимости коэффициента отражения для образцов с параметрами, соответствующими данным таблицы 2.4.

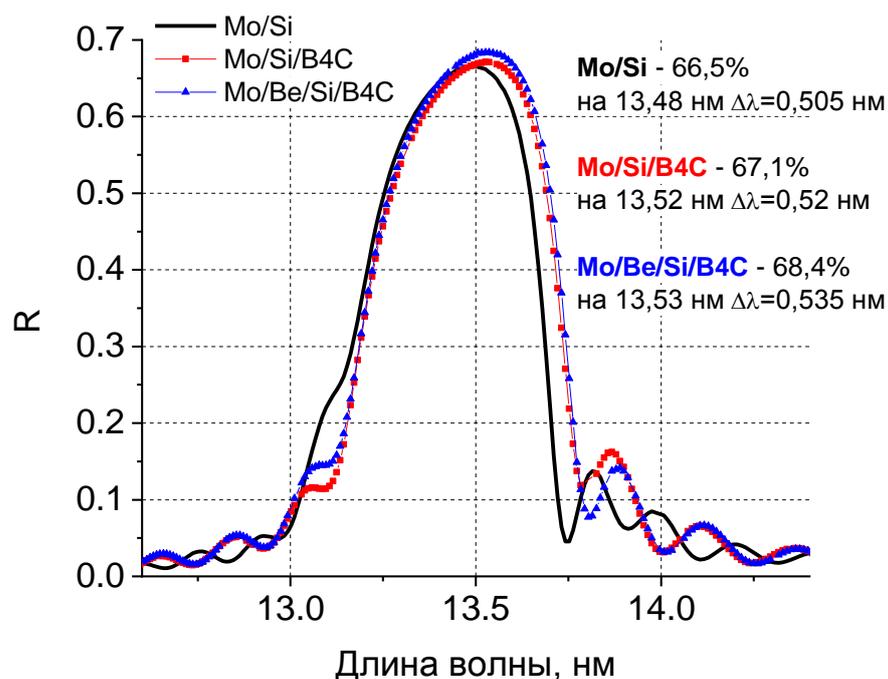


Рис. 2.21. Спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C. Угол падения излучения 2° от нормали.

Из рис. 2.21 видно, что многослойные зеркала Mo/Be/Si/B₄C демонстрируют бóльшую отражательную эффективность. По высоте пика отражения четырехкомпонентная структура превосходит двухкомпонентную 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/B₄C оказывается максимальной и составляет 0,535 нм.

Можно оценить интегральные коэффициенты отражения исследуемых зеркал в случае использования их в 11-зеркальной схеме литографической установки. На рис. 2.22 сравниваются интегралы под спектральными зависимостями коэффициентов отражения после прохождения излучения через такую оптическую схему для исследуемых многослойных зеркал Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C. Можно увидеть, что при переходе от МЗ Mo/Si (R=66,5%; Δλ=0,505 нм) к Mo/Be/Si/B₄C (R=68,4%; Δλ=0,535 нм) интегральный коэффициент отражения 11-зеркальной схемы увеличится на 44 %.

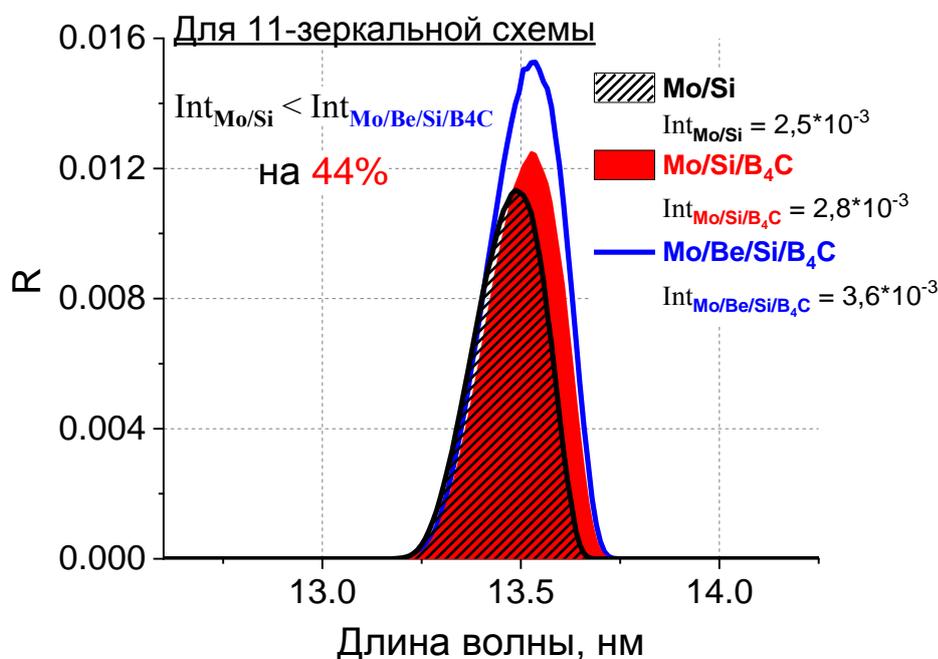


Рис. 2.22. Сравнение интегральных коэффициентов отражения 11-зеркальной схемы, посчитанных по экспериментальным спектральным зависимостям коэффициентов отражения для исследуемых зеркал Mo/Si, Mo/Si/B₄C и Mo/Be/Si/B₄C (рис. 2.5).

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.

Дополнительно проводилось исследование микроструктуры Ве слоев разной толщины с помощью комбинации методов малоугловой рентгеновской рефлектометрии и комбинационного рассеяния видимого света в многослойных зеркалах Мо/Ве [A12, A22, A23]. Наблюдалась трансформация структуры Ве в зависимости от его толщины. При сохранении периода ($d=6$ нм) многослойной структуры последовательно, от образца к образцу, менялась толщина бериллия от 0,5 нм до 5,5 нм. Измерялись угловые зависимости коэффициента отражения и спектры комбинационного рассеяния для каждого случая. По рефлектометрическим данным с помощью моделирования определялись толщины слоев. Исследование спектров комбинационного рассеяния показало, что слои бериллия в МЗ Мо/Ве имеют полностью аморфную структуру вплоть до некоторого значения толщины слоя. Начиная с толщины 2,4 нм, Ве слой представляет собой аморфную матрицу с некоторой долей кристаллической фазы материала. Доля кристаллической фазы растет при дальнейшем увеличении толщины Ве слоя. Так как в исследуемых МЗ Мо/Ве/Si/В₄С слои Ве имеют «барьерную» толщину (таблица 2.3), которая значительно меньше толщины, при которой начинает образовываться кристаллическая фаза, можно считать, что они имеют аморфную структуру.

Выводы об изменении интерфейсов в Мо/Ве/Si/В₄С МЗ, сделанные на основе данных рентгеновской рефлектометрии были полностью подтверждены с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Так же метод РФЭС позволил нам объяснить физико-химические механизмы на границах, приведшие к повышению качества интерфейсов и, соответственно, коэффициентов отражения. Так в [A6] удалось оценить величины протяженности обоих интерфейсов Мо-на-Si и Si-на-Мо в многослойном зеркале Мо/Si. В [A10] на основе этого подхода исследовалось уже влияние прослоек Ве и В₄С на микроструктуру межслоевых областей в МЗ Мо/Si. Рассматривались промежуточные соединения между основными и барьерными материалами зеркала в случае нанесения барьерных слоев на разные границы. Было отмечено, что образование соединения Si–Ве имеет практически нулевую энергию реакции. Это означает, что прослойка Ве химически взаимодействует только с молибденом, тем самым предотвращая образование силицида MoSi₂.

В случае прослойки W_4C взаимодействие происходит и с Mo , и с Si . В результате осаждения пленки молибдена на слой бериллия первоначально образуется бериллид MoBe_2 , который затем взаимодействует с кремнием и переходит в бериллид молибдена с высоким содержанием бериллия MoBe_{12} и дисилицид молибдена MoSi_2 .

Иная ситуация возникла при осаждении бериллия на молибден. Осаждение бериллия на молибден немедленно привело к образованию бериллида, богатого бериллием. Согласно расчетам, нанесенный впоследствии слой кремния химически не взаимодействует с MoBe_{12} , так как соединение кремния с бериллием имеет нулевую энергию реакции. Это означает, что введение тонкого слоя бериллия между пленками молибдена и кремния приводит к образованию двух интерфейсов разного состава. Таким образом, Be выгоднее осаждать на границу Si -на- Mo , так как в этом случае не образуется MoSi_2 , в отличие от случая Be на границе Mo -на- Si .

Исследование структур с нанесенной прослойкой W_4C на разные границы в МЗ Mo/Si показало, что тонкий слой W_4C полностью разлагается с образованием соединений MoB_x и SiC на обеих границах. Кроме того, на границе Si -на- Mo также образовались соединения SiB_x и Mo_xC . Также было выявлено присутствие MoSi_2 на обеих границах. На основе анализа значений энергий реакции соответствующих соединений показано, что Mo_2C и особенно SiC демонстрируют большую по абсолютной величине энергию реакции по сравнению с W_4C . Это свидетельствует о том, что диффузионно-барьерная функция прослойки W_4C может быть обусловлена стабильностью образующихся соединений, а не стабильностью самого слоя W_4C .

Таким образом, на основании исследования образования межфазных областей при введении барьерных слоев Be и W_4C в МЗ Mo/Si в [A10] предложена следующая модель взаимодействия материалов. Введение тонкого барьерного слоя Be препятствует образованию MoSi_2 на границе Si -на- Mo и приводит к образованию бериллида MoBe_{12} с высоким содержанием бериллия. В остальных случаях (внедрение слоя Be на границе Mo -на- Si и W_4C на обеих границах) MoSi_2 остается. При этом также образуется бериллид MoBe_{12} в $[\text{Si/Be/Mo}]_{50}$, борид молибдена в структурах $[\text{Si/W}_4\text{C/Mo}]_{50}$ и $[\text{Mo/W}_4\text{C/Si}]_{50}$ и борид кремния в структуре $[\text{Mo/W}_4\text{C/Si}]_{50}$. Хотя Be на границе раздела Mo -на- Si не полностью предотвратил образование MoSi_2 , наблюдается некоторое улучшение интерфейса за счет уменьшения

протяженности образовавшихся прослоек. В структуре $[\text{Si}/\text{W}_4\text{C}/\text{Mo}]_{50}$ барьерный слой W_4C приводит к образованию полного набора возможных соединений: карбидов и боридов кремния и молибдена. В этом случае довольно сложно оценить возможное улучшение интерфейса.

Данные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе методом рентгеновской рефлектометрии. У многослойного зеркала, в котором пленка бериллия осаждалась на молибден, наблюдалось уменьшение шероховатости на границе Si-на-Mo, и как следствие – увеличение коэффициента отражения. Наибольший сглаживающий эффект (и коэффициент отражения) наблюдался в случае нанесения барьерных слоев на обе границы (МЗ Mo/Be/Si/W₄C).

В [A19] отдельно исследована граница между Be и Mo. Показано, что образование бериллидов молибдена разной стехиометрии приводит к размытию границы. Более того происходит асимметричное формирование границ Mo-на-Be и Be-на-Mo, что можно объяснить с точки зрения двух основных механизмов формирования зоны перемешивания в условиях, близких к условиям магнетронного распыления. Первый механизм связан с баллистическим столкновением между падающими атомами и атомами поверхности. Второй обусловлен обменом атомами между поверхностным и приповерхностным слоями из-за разности поверхностных энергий. Указано, что переходная зона Mo-на-Be формируется за счет сильного проникновения атомов Mo в слой Be, обусловленного обоими механизмами, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, указывающими на образование соединения MoBe₁₂ на данной границе. Зона Be-на-Mo формируется только за счет проникновения в пределах фактически одного монослоя при баллистических столкновениях, что приводит к образованию бериллида с меньшим содержанием бериллия – MoBe₂.

2.4. Основные результаты главы 2

Основными результатами главы 2 диссертационной работы стало 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 регламент 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 Mo/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%.

По результатам главы 2 опубликованы следующие работы: [A2], [A5], [A6], [A10], [A11], [A19] и [A12].

Глава 3. Многослойные зеркала на основе бериллия для спектральной области 17–30 нм.

3.1. Многослойные зеркала Be/Al с буферными слоями Si

Как отмечалось в п. 1.2.2., существуют проблемы получения желаемых отражательных характеристик многослойных зеркал, спроектированных по классической схеме для области длин волн 17–40 нм. Для решения этих проблем требуется поиск новых подходов и новых составов. Альтернативный подход связан с сочетанием в составе МЗ двух слабо поглощающих материалов. Одним из таких материалов может быть бериллий. Из рис. 1.4 следует, что на длинах волн больших 17 нм, одним из наиболее прозрачных (малое γ) материалов является алюминий. Бериллий же, кроме низкого поглощения (γ), обладает большим рассеянием (δ) по отношению к алюминию, чем другие слабо поглощающие материалы, что, в случае использования его как рассеивающего материала в МЗ типа Be/Al, удовлетворяет условию максимизации скачка диэлектрической проницаемости на границе слоёв.

Использование в структуре МЗ только слабо поглощающих материалов позволяет увеличить глубину экстинкции и, следовательно, повысить спектральную селективность. Несмотря на меньший скачок диэлектрической проницаемости, по сравнению с классическим подходом, пиковый коэффициент отражения остаётся довольно высоким за счет низкого поглощения излучения в МЗ.

На рис. 3.1 представлены теоретические зависимости R и $\Delta\lambda$ от длины волны для МЗ нормального падения Be/Al. При расчетах угол скольжения излучения выбирался 88° (2° от нормали). В расчете для каждой длины волны подбирался период структуры, обеспечивающий выполнение условия Вульфа-Брэгга при этом угле падения.

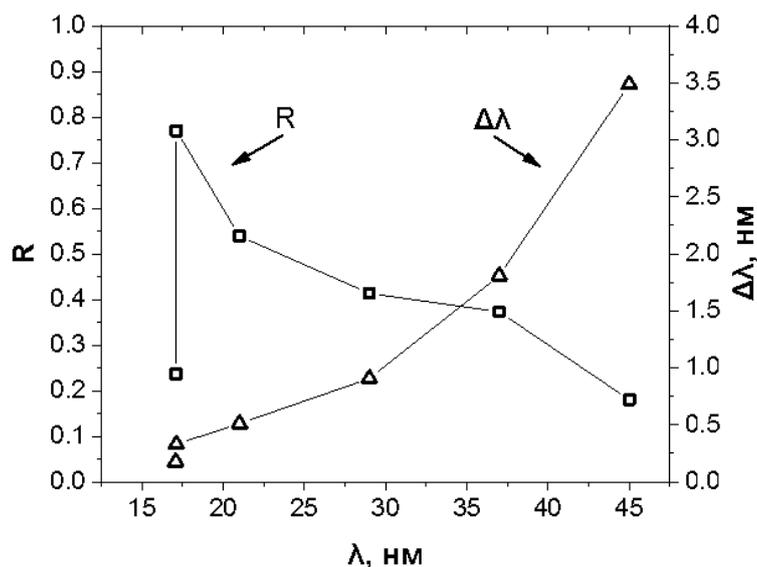


Рис. 3.1. Теоретические зависимости пикового коэффициента отражения R и спектральной полосы пропускания $M3 \Delta\lambda$ для зеркала Be/Al при фиксированном угле скольжения 88° .

Видно, что теоретически $M3 Be/Al$ в диапазоне от 17 до 40 нм обладают довольно высокими R при относительно малых $\Delta\lambda$ (свыше 70% и около 0,3 нм в окрестности длины волны 17 нм).

Однако на практике наблюдается значительное отличие теоретической и экспериментальной отражательных способностей. В [1] рассматривалась отражательная способность двухкомпонентного $M3 Be/Al$ и Be/Al с буферными слоями Si на длине волны 17,14 нм при углах падения близких к нормали. Показано, что введение промежуточного слоя Si толщиной около 1 нм в каждый период увеличило пиковый коэффициент отражения с 47% до 60%. Моделирование показало снижение межслоевой шероховатости с 1,3 нм для $M3 Be/Al$ до 0,6 нм для $M3 Be/Si/Al$. В работе сглаживание межслоевой шероховатости объясняется тем, что когда Al пленка растет на аморфном Si , то она не успевает кристаллизироваться, и, как следствие, шероховатости сильно не развиваются.

Не смотря на рекордный коэффициент отражения 60% на длине волны 17,1 нм [1], тем не менее, он значительно уступает теоретическому пределу около 76%. Поэтому поиск путей повышения коэффициента отражения является крайне актуальным.

Важно отметить, что, как следует из расчетов, помимо окрестности длины 17 нм Ве/Al МЗ хорошо отражают и при больших длинах волн, вплоть до 30–40 нм. Так же есть приложения, когда зеркала работают при малых скользящих углах, что требует увеличение периода при заданной длине волны. Однако исследование МЗ с большими периодами, а значит толщинами пленок Al и Ве в периоде, ранее не проводилось. Так же не исследовалась долговременная стабильность Al/Ве МЗ, что является крайне важным для практических применений.

Таким образом, предметом исследований в данном разделе диссертации стало следующее:

1. Оптимизация конструкции и технологического процесса для повышения коэффициента отражения Al/Ве МЗ на область 17 нм;
2. Изучение Al/Ве МЗ с большими периодами с целью расширения их рабочего диапазона;
3. Исследование временной стабильности коэффициента отражения и положения брэгговских пиков во времени.

В рамках решения первой задачи проведена оптимизация толщин слоёв для зеркал Ве/Si/Al на длину волны 17,1 нм. Период таких МЗ ~ 9 нм, оптимальная толщина Al ~ 4 нм. В рамках исследования была синтезирована серия МЗ на основе Ве/Al, расчетные и экспериментальные отражательные характеристики, которых приведены в таблице 3.1. Серия состояла из чистого Ве/Al МЗ и образцов с Si прослойками на разнотипных границах, и на обеих границах одновременно. Как и в исследовании [1] толщина прослойки Si была выбрана 1 нм. Как видно из таблицы, Si прослойки на обеих границах приводят к заметному росту коэффициента отражения. Однако лучший результат показала система Ве/Si/Al. МЗ Ве/Si/Al имело следующие параметры: толщина $d_{\text{Ве}}=3,6$ нм (шероховатость $\sigma_{\text{Ве}}=0,4$ нм); $d_{\text{Si}}=1$ нм ($\sigma_{\text{Si}}=0,2$ нм); $d_{\text{Al}}=4$ нм ($\sigma_{\text{Al}}=0,6$ нм). В результате исследования достигнут рекордный пиковый коэффициент отражения 62,5% (рис. 3.2, кривая, помеченная треугольниками [A7, A8]). Измерения проведены на синхротроне BESSY-II.

Несмотря на то, что нанесение Si на любую из границ приводит к увеличению коэффициента отражения, тем не менее, нанесение на обе границы одновременно приводит к меньшему коэффициенту отражения, чем при напылении прослойки на

границу Al-на-Be. Это связано с дополнительным поглощением в кремниевой прослойке.

Таблица 3.1. Расчетные и экспериментальные отражательные характеристики МЗ типа Be/Al с буферными слоями Si на длине волны 17,1 нм.

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

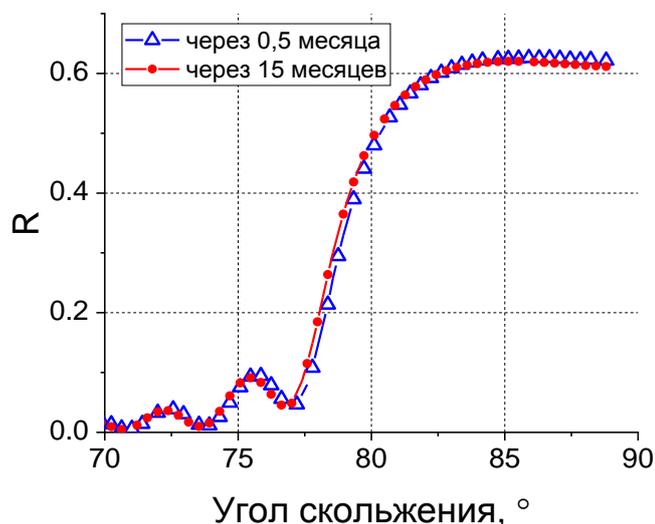


Рис. 3.2. Сравнение угловых зависимостей коэффициентов отражения, полученных в разное время на синхротроне BESSY-II для МЗ Be/Si/Al, оптимизированного на скользящий угол падения 85°. Измерения проводились на длине волны 17,1 нм.

Следующей задачей диссертационной работы стало изучение МЗ Be/Al для работы на длине волны 30,4 нм (линия иона He II в солнечной короне).

В таблице 3.2 представлено сравнение пиковых значений коэффициентов отражения R и спектральной полосы пропускания Be/Al и наиболее перспективных Mg-содержащих МЗ, которые из-за близости L-края поглощения Mg к длине волны

30,4 нм обладают наименьшим поглощением. В расчётах были приняты нулевые шероховатости и табличные значения плотностей материалов.

Таблица 3.2. Сравнение расчетных отражательных свойств на длине волны 30,4 нм наиболее перспективных МЗ на основе Mg и Be/Al.

Структура	$\Delta\lambda$, нм	R,%
Be/Mg	1,52	68,5
Si/Mg	1,04	57
SiC/Mg	1,84	55,7
Be/Al	1	41

Как следует из расчетов, Be/Al МЗ уступает по коэффициенту отражения магниевым зеркалам. Однако, во-первых, обладает лучшей спектральной селективностью; во-вторых, обладают заметно лучшей временной стабильностью рентгенооптических характеристик, о чем будет сказано ниже. Напротив, как анализируется в Главе 1, традиционные МЗ на основе Mg обладают плохой временной стабильностью. Таким образом, изучение свойств МЗ Be/Si/Al, оптимизированных на длину волны 30,4 нм, представляет значительный интерес.

Оптимизированный период и толщина алюминия в таких зеркалах: $d=16,7$ нм; $d_{Al}=8,7$ нм. Были синтезированы два типа МЗ: Be/Al и Be/Si/Al с периодами около 16,7 нм. Толщина прослойки Si составила 1 нм. На рис. 3.3 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения для данных МЗ (измерения выполнены на лабораторном рефлектометре с монохроматором ЛНТ-30 [99]).

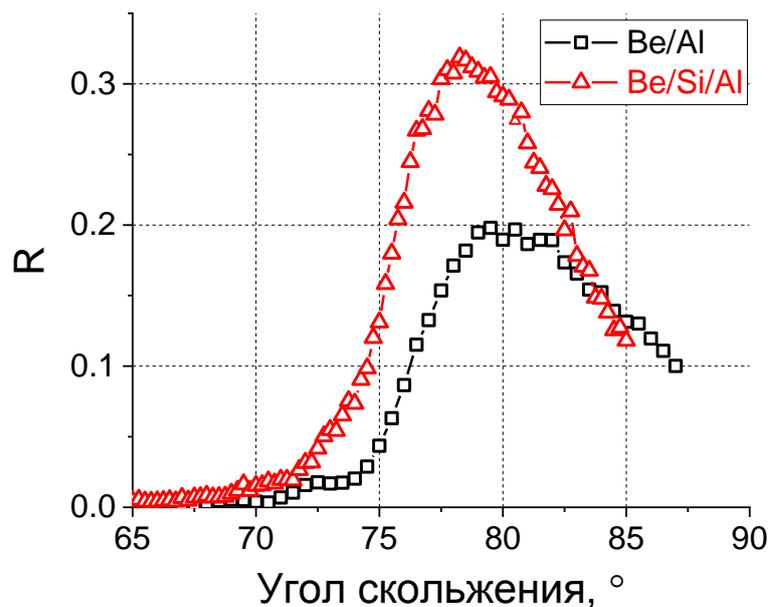


Рис. 3.3. Угловые зависимости коэффициентов отражения для МЗ Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на скользящий угол падения 80°. Измерения проводились на длине волны 30,4 нм.

Несмотря на небольшое различие в периодах зеркал, можно отметить очевидное преимущество в отражательной способности образца с барьерным слоем Si. Пиковое значение коэффициента отражения для МЗ Be/Si/Al составило около 34%, для МЗ Be/Al около 20%. Таким образом, можно констатировать, что сглаживающий эффект от прослоек Si имеет место и для толщин пленок алюминия 8,7 нм. При этом величина спектральной селективности, вычисленная из данных измерений по формуле $\lambda/\Delta\lambda = \text{tg}\theta/\Delta\theta$ ($\theta=79$ градусов, $\Delta\theta=9$ градусов) составляет 32,7 или $\Delta\lambda=0,93$ нм. Эта величина удовлетворяет требованиям новых солнечных обсерваторий ($\Delta\lambda < 1,2$ нм).

Для изучения Li-плазмы необходимы были зеркала с еще большим периодом. В рамках данной работы разработаны и синтезированы зеркала на основе Be/Al, оптимизированные на длину волны 26 нм при угле скольжения излучения 33,5° [A17]. Период и толщина алюминия в таких структурах: $d=29$ нм; $d_{Al}=15,7$ нм. В данном случае также применялся барьерный Si слой, толщина которого составила 2 нм. Барьерный слой вводился с сохранением общего периода, за счет уменьшения толщин Al слоев.

Толщина барьерного слоя выбиралась из следующих соображений. В работе [1] показано, что минимально допустимое значение толщины прослойки Si 0,8 нм. Как правило, на практике стараются не оперировать граничными значениями, поскольку вследствие флуктуаций технологического процесса можно попасть в область меньших значений и утратить эффективность прослойки. То есть рекомендуется выбирать толщину прослойки немного больше. При периодах около 9 нм выбрать значения, большие 1 нм, проблематично: в этом случае критически снизятся толщины основных материалов. Однако при периодах около 30 нм ничто не мешает увеличить толщину барьерного слоя до 2 нм – снижение толщин основных материалов, каждого еще на 0,5 нм, пренебрежимо мало сказывается на коэффициенте отражения.

На рис. 3.4 приведены данные малоугловой рентгеновской дифракции в логарифмическом масштабе. Сравниваются угловые зависимости, полученные для зеркал Be/Al и Be/Si/Al, оптимизированных на максимум отражения на длине волны 26 нм при угле скольжения излучения $33,5^\circ$.

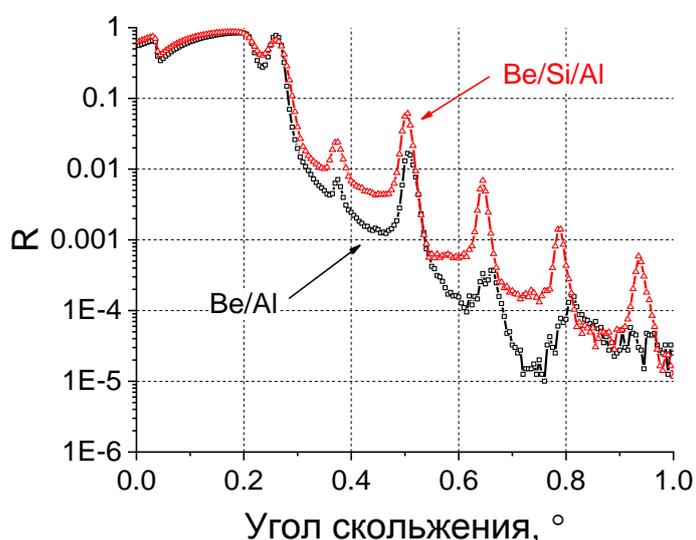


Рис. 3.4. Сравнение данных малоугловой рентгеновской рефлектометрии, полученных для двухкомпонентного МЗ Be/Al и аналогичного МЗ с Si прослойкой, оптимизированных на скользящий угол падения $33,5^\circ$. Измерения проводились на длине волны 0,154 нм.

Видно, что в случае трёхкомпонентного зеркала наблюдается более высокие пики дальних дифракционных порядков. Это свидетельствует о меньшей протяженности переходных областей на границах слоев при использовании Si прослойки. Иными словами, и для «толстых» пленок Al наблюдается сглаживающий эффект Si прослоек.

На синхротроне BESSY-II были измерены угловые и спектральные зависимости пикового коэффициента отражения для всего набора зеркал. На рис. 3.5 изображены наложенные друг на друга спектральные зависимости коэффициента отражения для структур Be/Al, Be/Si/Al, Be/Al/Si, Be/Si/Al/Si (порядок материалов слева направо от подложки к поверхности), снятые при угле скольжения $33,5^\circ$. Максимумы кривых расположены вблизи длины волны 26 нм.

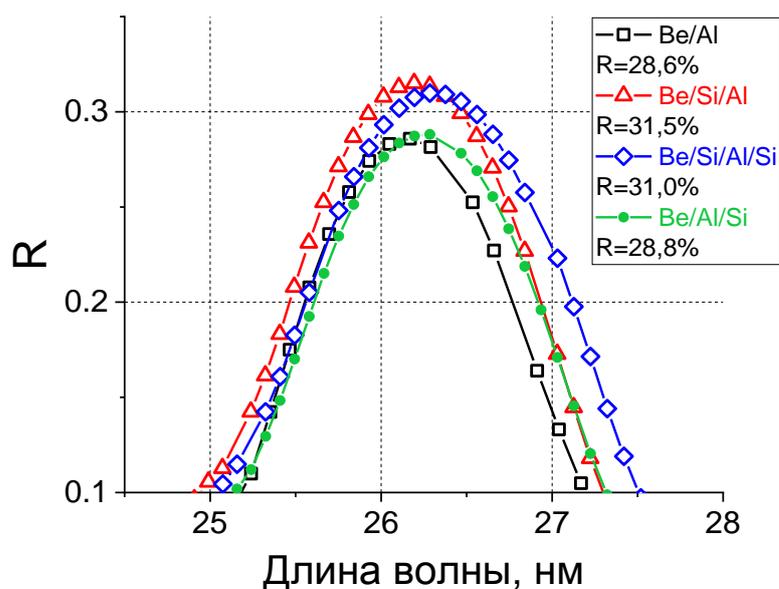


Рис. 3.5. Спектральные зависимости коэффициентов отражения зеркал типа Be/Al с прослойками и без. Угол скольжения $33,5^\circ$.

Среди представленных на рис. 3.5 данных, наибольшим коэффициентом отражения обладает зеркало Be/Si/Al. Нанесение Si именно сверху на Be границу позволяет увеличить коэффициент отражения. Нанесение Si на другую границу такого эффекта не даёт. В случае, когда Si наносится на обе границы, также наблюдается увеличение отражательной способности по сравнению с

двухкомпонентным зеркалом, но при этом пиковый коэффициент отражения немного меньше, чем в случае трёхкомпонентного варианта с Si на Be.

В результате подгонки с помощью программы «Multifitting» параметров MЗ по данным малоугловой рентгеновской рефлектометрии, полученным на лабораторной установке, и данным рефлектометрии, полученным на синхротроне BESSY-II, определены основные структурные параметры многослойных зеркал. В таблице 3.3 приведены данные об индивидуальных толщинах слоёв и среднеквадратичных шероховатостях для каждого типа зеркала.

Таблица 3.3. Основные параметры исследуемых образцов ($\langle d(M) \rangle$ – средняя толщина пленки материала M: Be, Al, Si, σ – среднеквадратичная шероховатость).

Структура	$\langle d(M) \rangle$, нм	σ , нм
sub/Be/Al	h(Al)=15,7 h(Be)=13,0	σ (Al)=2,3 σ (Be)=2,3
sub/Be/Si/Al	h(Al)=14,7 h(Si)=2,0 h(Be)=12,4	σ (Al)=1,3 σ (Si)=0,7 σ (Be)=1,0
sub/Be/Si/Al/Si	h(Si)=2,0 h(Al)=14,6 h(Si)=2,0 h(Be)=10,7	σ (Si)=0,7 σ (Al)=0,8 σ (Si)=0,7 σ (Be)=1,0
sub/Be/Al/Si	h(Si)=2,0 h(Al)=14,6 h(Be)=12,7	σ (Si)=0,7 σ (Al)=0,8 σ (Be)=1,9

При сравнении параметров для всех типов зеркал, видно, что введение прослойки Si при данных толщинах материалов приводит к заметному уменьшению среднеквадратичных шероховатостей (σ) по сравнению с зеркалами без прослоек. Это говорит о большей резкости межслоевых границ многослойных зеркал, где использовался Si, и у Be/Si/Al/Si эти границы оказываются наиболее резкими. Однако из-за большего суммарного поглощения структуры (дополнительный слой кремния, менее прозрачного, чем алюминий или бериллий) выигрыша в отражении в сравнении с Be/Si/Al не наблюдается.

Из результатов, полученных в данной работе, 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 при росте пленок Al и на аморфном Si полная кристаллизация слоя не происходит, что снижает шероховатость поверхности и, соответственно, границ Ве-на-Al.

Оценка временной стабильности рентгенооптических характеристик Ве/Si/Al МЗ производилась как с использованием синхротронных, так и лабораторных рефлектометров. На рис. 3.2 и 3.6 приведены угловые, снятые на длине волны 17.1 нм и спектральные, при угле падения 2° , зависимости коэффициентов отражения, полученные на синхротроне BESSY-II через полмесяца после синтеза структуры и через 15 месяцев. Период и толщина алюминия в данном зеркале: $d=8,6$ нм; $d_{Al}=4$ нм. Можно увидеть, что изменения коэффициента отражения незначительны, на уровне 1%. Положение пиков вообще не изменилось в пределах ошибки измерений, что говорит о высокой временной стабильности МЗ Ве/Si/Al даже при их хранении в комнатных условиях.

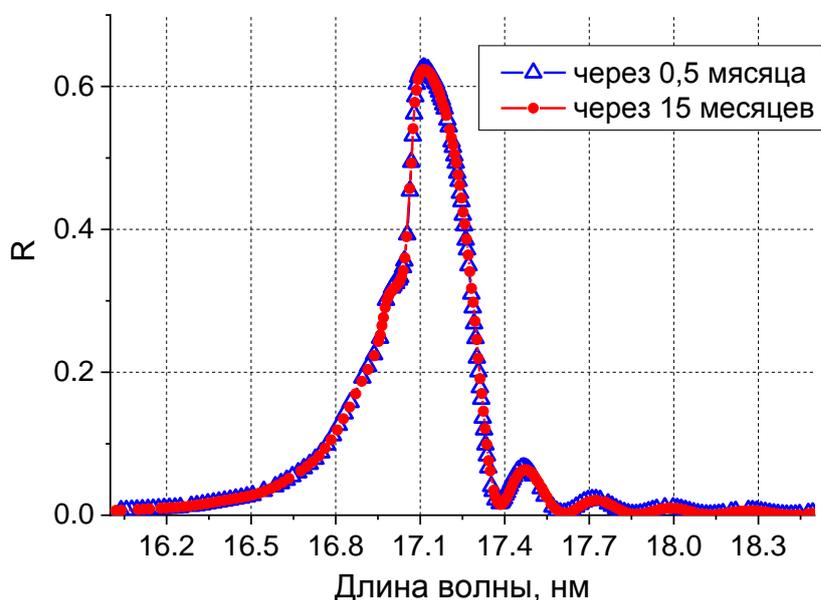


Рис. 3.6. Спектральные зависимости коэффициента отражения для МЗ Ве/Si/Al, полученные в разное время на синхротроне BESSY-II. Измерения выполнены при угле падения излучения 2 градуса от нормали.

Зависимость пикового коэффициента отражения от времени наблюдения для образца Be/Si/Al с параметрами: $d=16,7$ нм; $d_{Al}=8,7$ нм, измеренная на лабораторном рефлектометре [99] приведена на рис. 3.7. Длина волны излучения составила 30,4 нм. Как можно видеть из рисунка, за 20 месяцев хранения на воздухе коэффициент отражения изменился не более чем на 2%, что указывает на высокую временную стабильность Be/Si/Al МЗ.

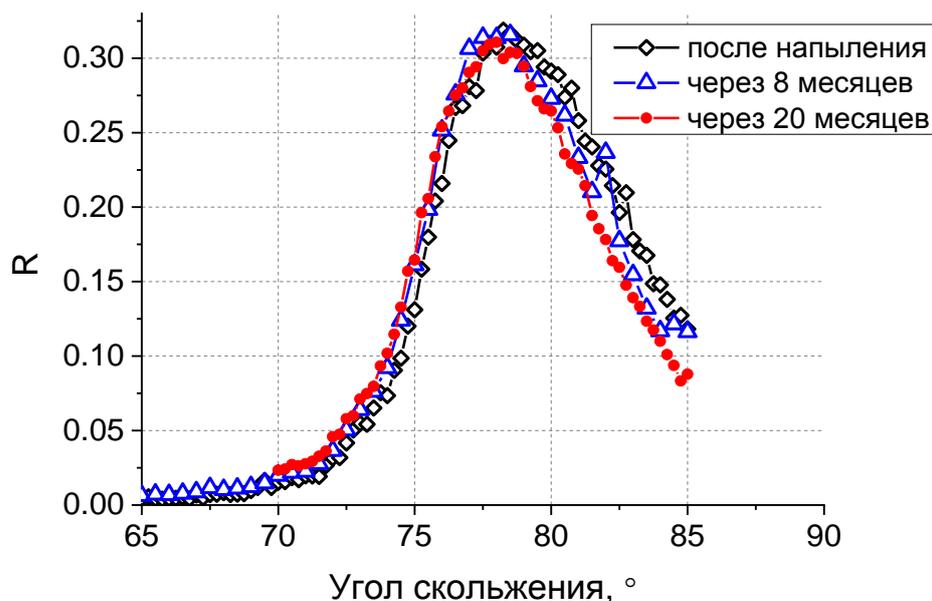


Рис. 3.7. Угловые зависимости коэффициента отражения зеркала Be/Si/Al, измеренные на длине волны 30,4 нм сразу после напыления, через 8 и через 20 месяцев.

Для образца Be/Si/Al с параметрами: $d=29$ нм; $d_{Al}=14,7$ нм, предназначенного для работы при скользящем угле падения $33,5^\circ$, угловые зависимости коэффициентов отражения, полученные через 16 месяцев и почти через 2 года после напыления, приведены на рис. 3.8. Измерения проводились на лабораторном рефлектометре на длине волны 0,154 нм для диапазона углов $0-2^\circ$. На рис. 3.9 приведены данные временной стабильности за полмесяца и за 20 месяцев, полученные на синхротроне BESSY-II, для образца Be/Si/Al/Si с такими же параметрами. Угловые зависимости коэффициента отражения данного зеркала снимались на длине волны 26 нм. Также приведены спектральные зависимости R для данного образца (рис. 3.10). Изменения в коэффициенте отражения составили

менее 1% как на угловых зависимостях, так и на спектральных. Таким образом, МЗ с данными толщинами периода и алюминиевого слоя также демонстрируют высокую временную стабильность.

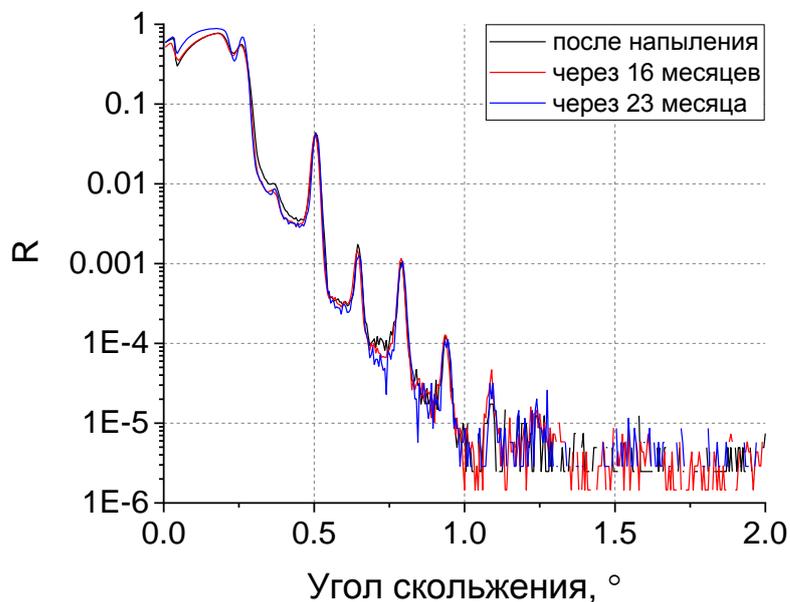


Рис. 3.8. Угловые зависимости коэффициента отражения зеркала Be/Si/Al, снятые на длине волны 0,154 нм сразу после напыления (черная кривая), через 16 месяцев (красная) и через 23 месяца (синяя).

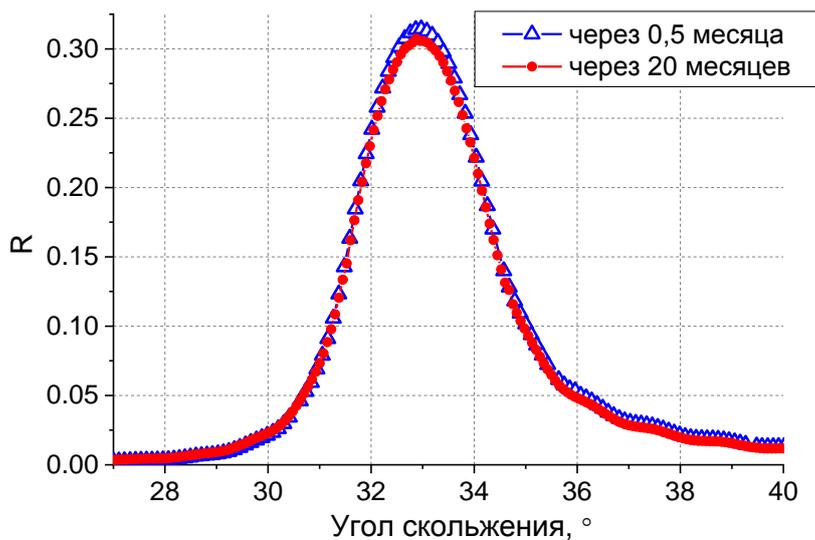


Рис. 3.9. Угловые зависимости коэффициента отражения для МЗ Be/Si/Al/Si, измеренные в разное время на синхротроне BESSY-II. Измерения выполнены на длине волны 26 нм.

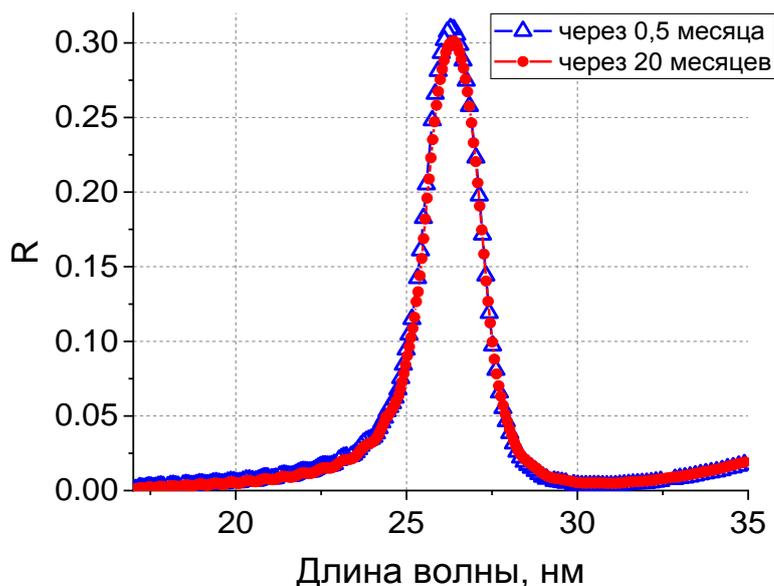


Рис. 3.10. Спектральные зависимости коэффициента отражения для МЗ Be/Si/Al/Si, измеренные в разное время на синхротроне BESSY-II. Измерения выполнены при угле скольжения $33,5^\circ$.

3.2. Многослойные зеркала Be/Mg для спектральной области вблизи 30,4 нм

На рис. 3.11 приведены спектральные зависимости действительной и мнимой добавок к показателям преломления ($n=1-\alpha+i\beta$) наиболее часто используемых рассеивающих материалов для магнийсодержащих зеркал в сравнении с бериллием.

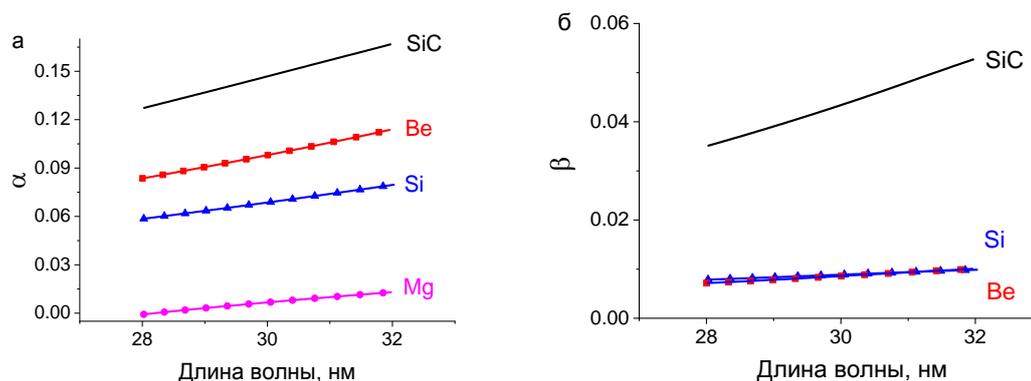


Рис. 3.11. Спектральные зависимости действительной (а) и мнимой (б) добавок к показателям преломления ($n=1-\alpha+i\beta$).

Из приведенных зависимостей следует, бериллий, имея близкое с кремнием поглощение, превосходит его по оптическому контрасту относительно магния $\alpha_{\text{scatter}} - \alpha_{\text{spacer}}$. Карбид кремния обладает большей рассеивающей способностью, однако его поглощение существенно больше, чем у бериллия. Таким образом, исходя из краткого анализа оптических свойств бериллий выглядит наиболее привлекательным рассеивающим материалом в магнийсодержащих МЗ.

На рис. 3.12 приведены расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения идеальных МЗ Mo/Si, Al/Mo/B₄C, Si/Mg, SiC/Mg и Be/Mg для диапазона длин волн 15–35 нм. Толщины слоев во всех структурах оптимизированы на максимум коэффициента отражения на длине волны 30,4 нм (первый порядок отражения). Число периодов для всех МЗ N=60, излучение падает по нормали к поверхности. Дополнительно на рисунке указаны эмиссионные линии для некоторых ионов солнечной короны.

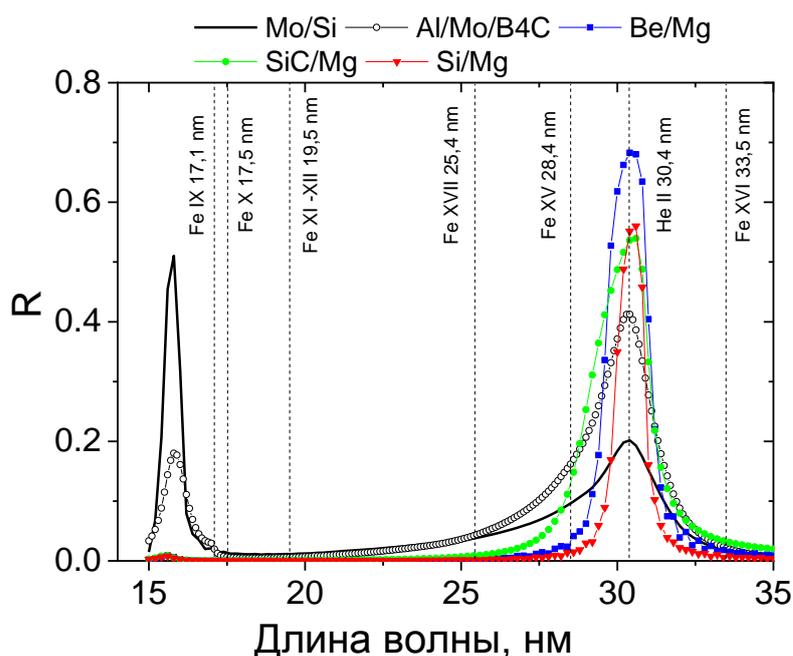


Рис. 3.12. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов отражения идеальных МЗ Mo/Si, Al/Mo/B₄C, Si/Mg, SiC/Mg и Be/Mg, оптимизированных на максимум отражения на $\lambda=30,4$ нм. Число периодов N=60.

Как видно из расчетов, МЗ Mo/Si обладает наименьшим отражением (около 20%) и худшей спектральной селективностью ($\lambda/\Delta\lambda < 10$) на длине волны 30,4 нм. Лучшей спектральной селективностью обладает МЗ Si/Mg (отражение на длинах

волн 28,4 нм и 33,5 нм 1,3% и 0,5%, соответственно). Но при этом его пиковое отражение значительно уступает Be/Mg (56,8% против 68,8%). Коэффициенты отражения Be/Mg МЗ на длинах волн 28,4 нм и 33,5 нм составили 2,3% и 1,6%, соответственно, так же находятся на приемлемом для практического использования уровне.

Очевидно, что второй порядок отражения МЗ, не содержащих Mg, высокий, в то время как для МЗ, содержащих Mg, второй порядок отражения не превышает 1%, что связано с сильным поглощением магния в диапазоне $\lambda < 25$ нм. Таким образом, использование Mg позволяет не учитывать линии соответствующих ионов и не разрабатывать специальные поглощающие фильтры.

Как уже отмечалось ранее, основным недостатком Mg-содержащих МЗ является плохая временная стабильность. Все меры защиты магниевых слоев от окисления лишь частично решают проблему, коэффициент отражения, как правило, падает до величины около 30%. Поэтому в данной работе большое внимание было уделено вопросам временной стабильности отражательных характеристик МЗ Be/Mg.

В наших экспериментах часть образцов в промежутках между измерениями хранилась в вакууме (давление остаточной атмосферы порядка 100 Па), а часть хранилась в комнатных условиях. Позже проводилось сравнение их отражательных характеристик.

На первом этапе исследовались двухкомпонентные Be/Mg-структуры. Восстановленные по данным рефлектометрии параметры (толщины индивидуальных слоев и величины шероховатостей) МЗ составили: $d_{\text{Be}} = 6,51$ нм, $d_{\text{Mg}} = 9,57$ нм, $\sigma(\text{Be-на-Mg}) = 0,35$ нм, $\sigma(\text{Mg-на-Be}) = 0,85$ нм.

Коэффициент отражения от такой структуры на длине волны 30,4 нм составил 49% (угол падения излучения 5° от нормали). Такое значительное отличие теоретически рассчитанного и экспериментально полученного отражения можно объяснить наличием в структуре оксидов. Временную стабильность отражательных характеристик МЗ $[\text{Be/Mg}]_{\text{x60/Be}_{6,5\text{нм}}}$ (запись означает, что верхним слоем МЗ является бериллий с толщиной 6,5 нм) иллюстрирует рис. 3.13, на котором приведена зависимость пикового значения коэффициента отражения на длине волны

30,4 нм от времени для двух МЗ – один образец хранился в комнатных условиях, второй в вакууме.

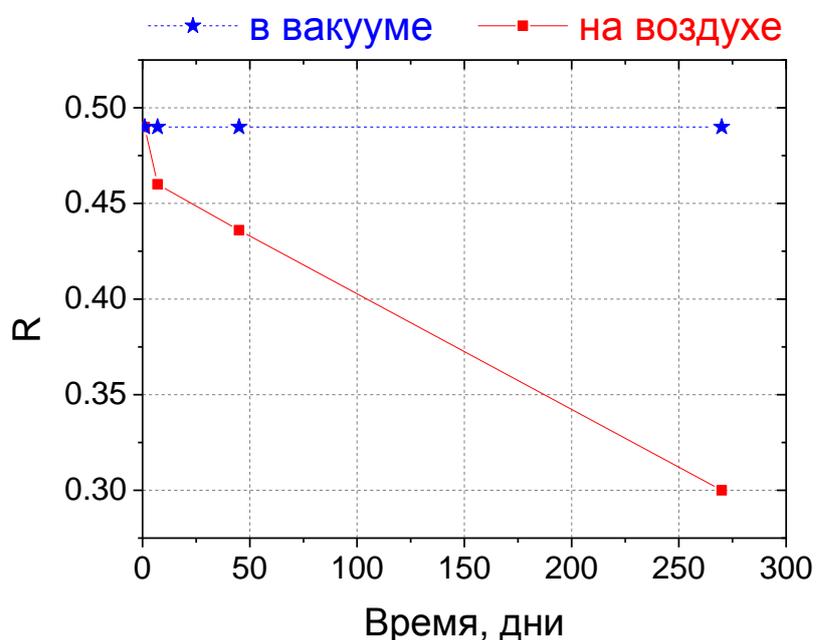


Рис. 3.13. Временная зависимость коэффициента отражения МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\times 60}/\text{Be}_{6,5\text{нм}}$ на длине волны 30,4 нм для образца, хранящегося в комнатных условиях (квадраты) и помещенного в вакуум (звездочки).

Как и для ранее изучавшихся магнийсодержащих структур наблюдается временная деградация коэффициента отражения. За 9 месяцев он упал с 49% до 30%. Исходя из того, что образец, помещенный в вакуум, продемонстрировал высокую стабильность, можно сделать вывод, что ключевым фактором, приводящим к деградации коэффициента отражения, является окисление.

В ходе экспериментов было изучено несколько вариантов защитных покрытий. Прежде всего, была предпринята попытка использовать в качестве защитного покрытия увеличенный до 10 нм верхний слой бериллия. Однако такая пленка не выполняет защитной функции: коэффициент отражения МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\times 60}/\text{Be}_{10\text{нм}}$ за месяц наблюдений снизился на 2%. Это несколько меньше, чем в случае 6,5 нм бериллия, но тенденция отрицательная.

Не выполняет защитной функции и пленка MoSi_2 . Изначально данный материал привлек наше внимание благодаря известному свойству предотвращения окисления при нанесении его на алюминиевые тонкопленочные фильтры [103]. В

нашем случае эксперименты проводились с пленками MoSi_2 толщиной 3 нм и 5 нм. В первом случае потеря коэффициента отражения за месяц составила 4%, во втором случае 1%. Но за девять месяцев наблюдений в обоих случаях потери превысили 15%, что также является неприемлемым уровнем потерь.

Мы впервые в качестве защитного слоя использовали пленку Al. В основе нашего подхода являлся неожиданный факт высокой стабильности Be/Al МЗ. Видимо эти слои и гетерограница не пропускают кислород внутрь. Пленка Al толщиной 13 нм осаждалась на поверхность последнего бериллиевого слоя. Нанесение алюминия на поверхность магниевого слоя не дало ожидаемого эффекта. Алюминий и магний не образуют резкой границы, служащей стоп-слоем для проникновения вглубь кислорода. Исследования показывают, что процесс перемешивания алюминия и магния на границе продолжают в течение длительного (сутки и недели) времени.

Напротив, алюминий и бериллий образуют хотя и шероховатую (σ до 1,3 нм), но постоянную во времени границу [1]. Эта граница, видимо, оказывается непроницаемой для кислорода.

Изучение временной стабильности отражательных характеристик МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\text{x60}}/\text{Be}_{6,5\text{нм}}/\text{Al}_{13\text{нм}}$ показало их неизменность (отличие не превышает 0,005 и сравнимо с вариацией коэффициента отражения по поверхности образцов) в течение 9 месяцев как для образца, хранящегося в вакууме, так и остававшегося на атмосфере. При этом данная структура обладает рекордно высоким коэффициентом отражения $R=56\%$ при умеренной полосе пропускания $\Delta\lambda=1,6$ нм ($\lambda/\Delta\lambda\approx 20$). На рис. 3.14 приведены снятые на оптической линии синхротрона BESSY-II спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\text{x60}}/\text{Be}/\text{Al}$ 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. Наряду с полосой пропускания на половине высоты важно отметить измеренное отражение на длинах волн 28,4 нм и 33,5 нм. Оно составило 1,2% и 2,3%, соответственно.

В дальнейшем измерения временной стабильности продолжились, на рис. 3.15 показаны угловые зависимости, измеренные на оптической линии синхротрона

BESSY-II в разное время. За довольно продолжительный период времени (чуть более 3,5 лет) изменение коэффициента отражения составило менее 1%.

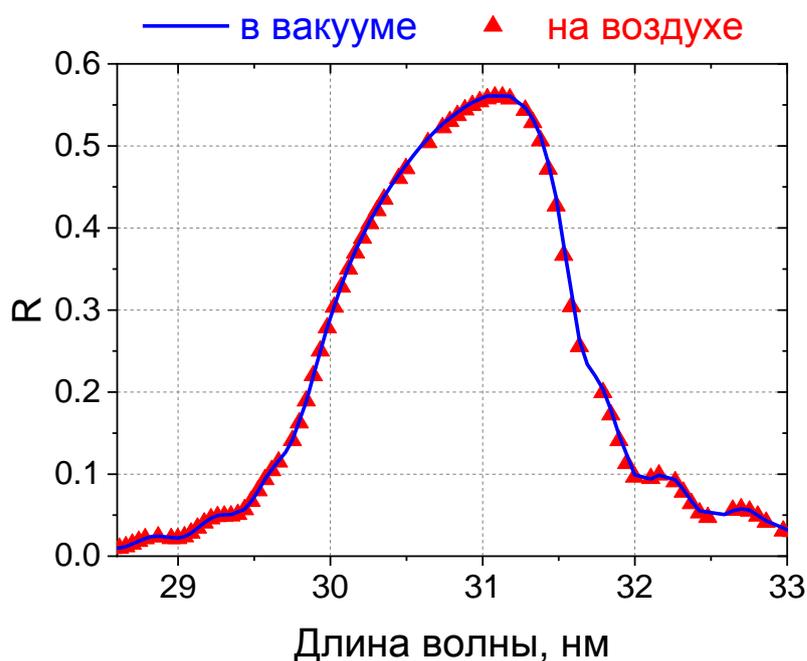


Рис. 3.14. Спектральные зависимости коэффициентов отражения МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\text{x60}}/\text{Be}_{6,5\text{нм}}/\text{Al}_{13\text{нм}}$ для образца, хранившегося на атмосфере (символы), и образца, хранившегося в вакууме (сплошная линия).

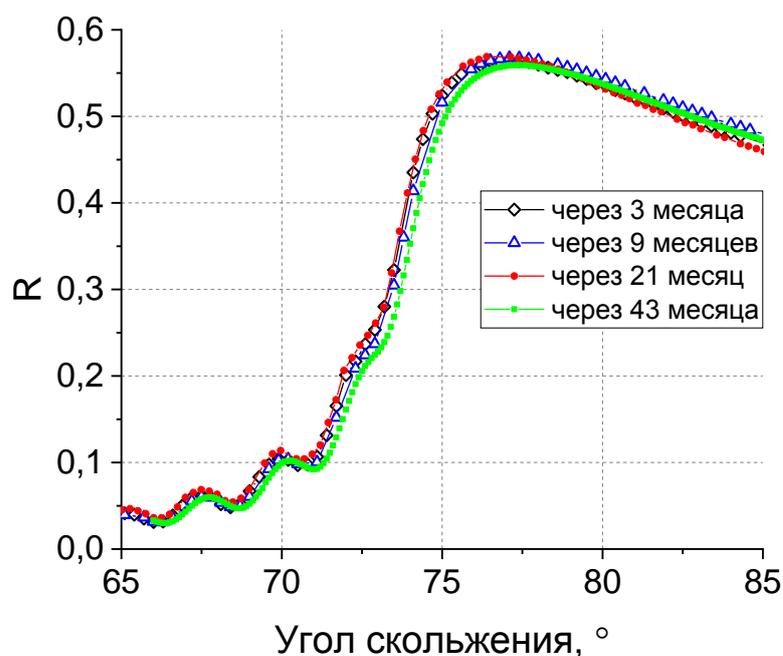


Рис. 3.15. Угловые зависимости коэффициентов отражения МЗ $[\text{Be}/\text{Mg}]_{\text{x60}}/\text{Be}_{6,5\text{нм}}/\text{Al}_{13\text{нм}}$, измеренные на длине волны 30,4 нм в разное время.

Таким образом, в данной работе впервые предложена новая пара материалов Ве/Mg для спектральной области 30 нм. Ве/Mg структура обладает достаточной для подавления близлежащих «паразитных» линий, спектральной полосой отражения $\Delta\lambda=1,6$ нм ($\lambda/\Delta\lambda\approx 20$). Использование пленки Al толщиной 13 нм в качестве верхнего защитного слоя позволило получить рекордный коэффициент отражения $R=56\%$ и стабилизировать структуру [A1, A3, A7]. Наблюдение за этими зеркалами в течение 3,5 лет не выявили значительной деградации коэффициента отражения. Это указывает на большие перспективы этой пары материалов для будущих миссий по изучению Солнца.

3.3. Основные результаты главы 3

Основные результаты главы 3 следующие:

1. 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.

2. 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 [Ве/Mg]x60/Ве/Alсуп получен рекордный коэффициент отражения 56%.

3. 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 [A15, A21].

По результатам главы 3 опубликованы следующие работы: [A1], [A3], [A7], [A8], [A15], [A17] и [A21].

Глава 4. Короткопериодные многослойные рентгеновские зеркала для мягкого и жесткого рентгеновских диапазонов.

Понятие короткопериодности в значительной мере условно. Чаще всего на практике короткими периодами считаются значения от 2–2,5 нм и меньше. Эти значения соответствуют зеркалам нормального падения для работы в диапазоне длин волн от 4 нм и выше. Также МЗ с подобными периодами широко применяются в качестве оптики скользящего падения для жесткого рентгеновского диапазона. Важной особенностью МЗ с такими периодами является сильная зависимость коэффициентов отражения от величины межслоевой шероховатости. В выражении (1.21) эта зависимость определяется отношением σ/d . При столь малых d ($<2,5$ нм) влияние шероховатости на отражение становится существенным. Даже при ангстремных шероховатостях коэффициент отражения может снижаться в разы. В рамках данной работы изучались МЗ W/Be, предназначенные для мягкого рентгеновского диапазона длин волн, а также Cr/Be для жесткого диапазона.

4.1. Короткопериодные многослойные зеркала W/Be для диапазона длин волн 0,67–3,14 нм

В области мягкого рентгеновского излучения, как правило, высоких коэффициентов отражения удается достигать вблизи краев поглощения химических элементов, на базе которых синтезируются структуры. Вдали от этих областей спектра эффективность отражающих покрытий может значительно снижаться. Как было показано в главе 1, в спектральном диапазоне «окна прозрачности воды» (2,2–4,4 нм) выделяется ограниченный набор таких краев поглощения: V L ($\lambda=2,42$ нм), Ti L ($\lambda=2,73$ нм) и Sc L ($\lambda=3,11$ нм).

Изученное в данной работе МЗ W/Be может эффективно перекрывать область между указанными длинами волн. На рис. 4.1 представлены теоретические расчеты коэффициентов отражения для идеальных зеркал нормального падения Cr/V, Cr/Ti и W/Be. Звездочками указаны экспериментально достигнутые значения отражения для Cr/V и Cr/Ti.

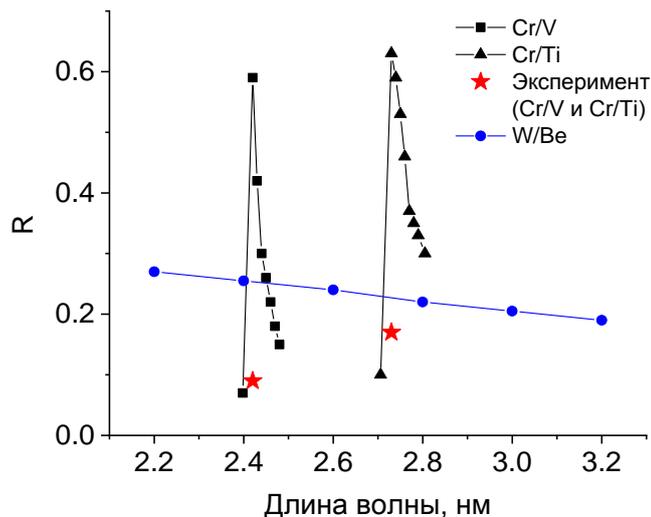


Рис. 4.1. Теоретически рассчитанные (линии с символами) и экспериментальные (звездочки) значения коэффициентов отражения некоторых многослойных зеркал в диапазоне «окна прозрачности воды».

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. Критически важным является вопрос о межслоевой шероховатости короткопериодных МЗ W/Be. В случае, если она окажется значительной, добиться высокого отражения на практике не удастся.

В данном пункте 4 главы рассматривается многослойное зеркало W/Be, используемое в качестве одного из зеркал монохроматора [A4]. Данное зеркало оптимизировано для работы в диапазоне длин волн 0,67–3,14 нм (~0,4–1,8 кэВ). Указанный диапазон включает в себя указанную проблемную область длин волн (2,3–3,1 нм). Благодаря удаленности К-края поглощения Be ($\lambda_K=11,1$ нм) и гладкой дисперсионной зависимости (рис. 1.4) в рассматриваемом диапазоне длин волн, поглощение этого материала существенно меньше, чем у C, B₄C и Si, что делает его наиболее перспективным из слабо поглощающих материалов. Приводятся результаты исследования отражательных характеристик синтезированного зеркала.

При разработке зеркал для двухзеркального монохроматора, помимо отмеченных в п. 1.4.1 требований повышения коэффициентов отражения и спектральной селективности, учитывались специфические требования, связанные с

конструкцией монохроматора: размер МЗ 5×30×40 мм. Весь диапазон рабочих углов монохроматора (отсчитываются от плоскости зеркала) составляет 5°–85°.

Для обеспечения максимальной эффективности отражения пара зеркал монохроматора должна быть идентичной. Спектральная селективность и допустимые отклонения периода Δd МЗ от номинального значения $d_{\text{ном}}$ связаны соотношением

$$\lambda/\Delta\lambda=d_{\text{ном}}/\Delta d \quad (4.1)$$

С учетом перемножения кривых отражения на выходе монохроматора, результирующая спектральная ширина зондового пучка меньше примерно в 1,4 раза по сравнению с однократным отражением. Поэтому, для обеспечения максимальной эффективности относительное отклонение периода от номинального значения должно быть $\Delta d/d_{\text{ном}} < 0,007$. Так как из одной пластины диаметром 100 мм вырезалось два зеркала, то равномерность периода по всей пластине выводилась с точностью лучше 0,4%.

Известно, что наибольший эффект на величину коэффициента отражения МЗ оказывает межслоевая шероховатость или, в общем случае, длина переходных слоев которая, в свою очередь, коррелирует с микрошероховатостью поверхности подложки. В значительном числе работ отмечается, что достаточной для большого числа применений является величина на уровне 0,2–0,3 нм. В данной работе использовались кремниевые подложки для микроэлектронной промышленности, подвергнутые химико-механической полировке на финальной стадии изготовления. Микрошероховатость пластин по кадру 2×2 мкм составляла около 0,1 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. 4.2. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия на рис. 4.2 (г) – измеренные значения.

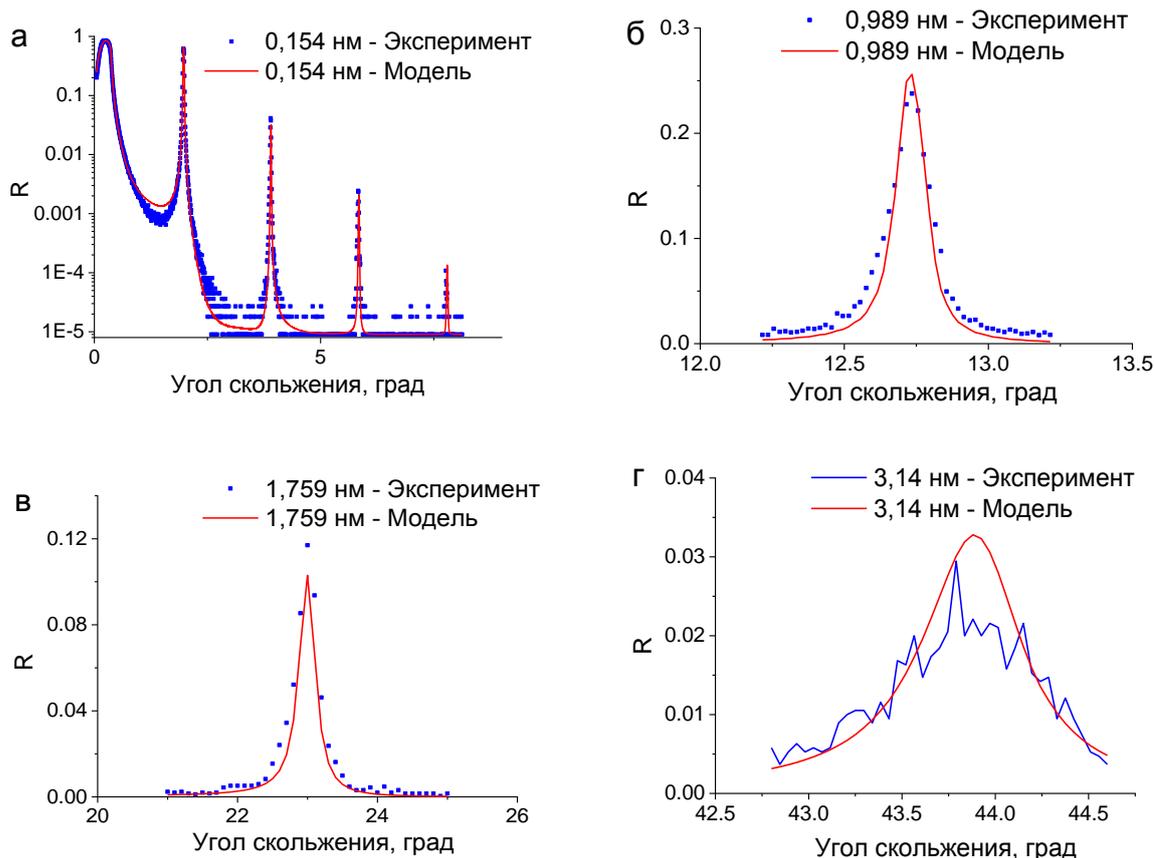


Рис. 4.2. Измеренные и полученные в результате подгонки угловые зависимости коэффициентов отражения МЗ на основе W/Be для длин волн: а – 0,154; б – 0,989; в – 1,759; г – 3,14 нм. Сплошные линии – подгонка, символы и ломаная линия – эксперимент.

Как видно из рисунка, экспериментальные кривые, за исключением длины волны 3,14 нм, соответствуют расчетным при следующих структурных параметрах МЗ: количество периодов $N = 200$; период $d = 2,28$ нм, средние по структуре толщины слоев вольфрама $d(W) = 0,95$ нм и бериллия $d(Be) = 1,33$ нм, плотность W 18 г/см^3 , плотность Be – табличная; толщины переходных слоев $\sigma(Be\text{-на-W}) = 0,4$ нм и $\sigma(W\text{-на-Be}) = 0,21$ нм.

Следует отметить, что последовательность границ с использованием метода рефлектометрии однозначно не определяется, соответственно, наилучшей границей может быть и Be-на-W. Как правило, эта проблема решается применением дополнительного метода электронной микроскопии поперечных срезов. Неудовлетворительное совпадение на длине волны 3,14 нм объясняется низкими интенсивностями зондового пучка и значениями коэффициента отражения МЗ.

Ситуация усугубилась вследствие близости угла падения к углу Брюстера, что автоматически уменьшило в два раза коэффициент отражения неполяризованного излучения.

Важно отметить относительно невысокое значение межслоевых шероховатостей. Это позволяет создать эффективное отражающее покрытие. На основе определенной методом подгонки модели МЗ вычислено значение пикового коэффициента отражения в рабочем диапазоне длин волн 0,67–3,14 нм (0,4–1,8 кэВ) двухзеркального монохроматора (рис. 4.3).

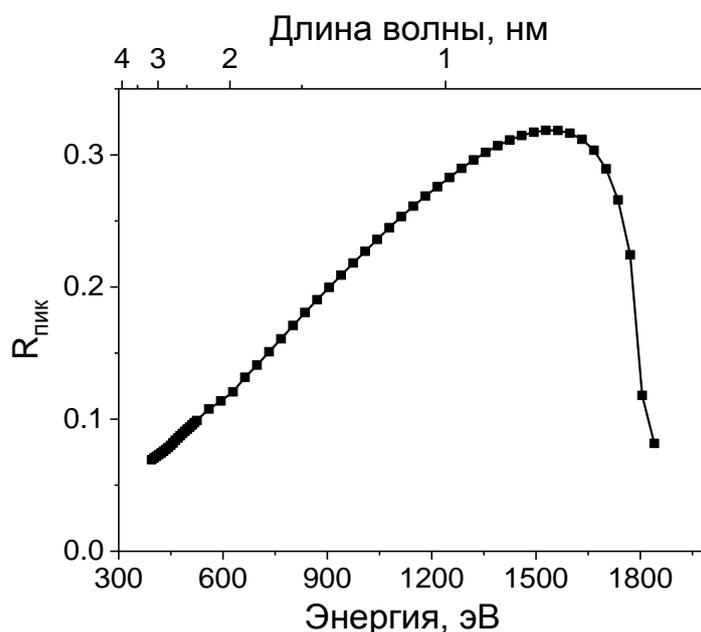


Рис. 4.3. Спектральная зависимость пикового коэффициента отражения МЗ W/Be для рабочего диапазона углов 8,5–44 град двухзеркального монохроматора.

Расчет для случая s-поляризованного излучения.

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 п. 2.3. В МЗ W/Be слои Be имеют 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.

4.2. Короткопериодные многослойные зеркала Cr/Be

В данном разделе диссертации методами рентгеновской рефлектометрии (XRR), диффузного рассеяния рентгеновского излучения (DXRS) и атомно-силовой микроскопии (AFM), исследуется микроструктура переходных слоев (интерфейсов) Cr/Be МЗ. Интерес к Cr/Be МЗ обусловлен, прежде всего, тем, что по данным расчета в диапазоне энергий фотонов 10–40 кэВ при одинаковых величинах периода эта система превосходит наиболее популярную пару материалов W/B₄C по спектральной селективности при сопоставимых, либо превышающих значениях коэффициента отражения (рис. 4.4).

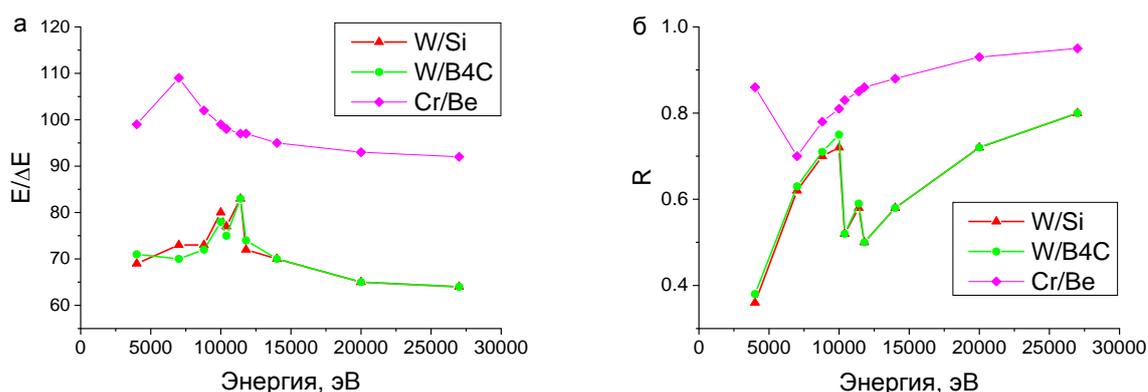


Рис. 4.4. Теоретические зависимости спектральной селективности (а) и пикового коэффициента отражения (б) от энергии. Расчет для случая нулевых шероховатостей на границах.

Комбинация XRR и DXRS методов позволила разделить вклады шероховатости и межслоевой диффузии/перемешивания для каждого образца и нахождение корреляции этих параметров с толщиной слоёв. AFM измерения поверхности дают референсные значения шероховатости для сравнения с рентгеновскими методами.

В работе исследовались 8 образцов Cr/Be периодических многослойных зеркал. Каждый образец состоял из 100 периодов с толщинами периода от 2,26 до

0,8 нм. Соотношение толщин Cr и Be сохранялось приблизительно одинаковым во всех структурах и составляло примерно $Cr : Be = 0,43 : 0,57$.

И шероховатость интерфейсов, и взаимопроникновение материалов слоёв (образование переходного слоя) приводят к уменьшению отражения, причем величина этих эффектов часто сравнима. По этой причине имеет смысл рассмотреть эффективный переходный слой, величину которого можно оценить по одним лишь рефлектометрическим измерениям. Это позволяет найти толщины слоёв структуры и сразу ранжировать зеркала по качеству интерфейсов сравнительно простым методом, численно моделируя отражение от структуры и подгоняя толщины слоёв и толщины интерфейсов. Влияние интерфейсов учитывалось с помощью разбиения переходной области на тонкие однородные слои. Профиль переходной области был взят в виде суммы функции ошибок и линейного профиля с весами [104], это позволило описать всю кривую отражения. Вместо верхней пары слоёв Cr и Be были взяты Cr_2O_3 и BeO, толщины, интерфейсы и плотности которых подгонялись независимо от основного стека для того, чтобы описать часть кривой отражения от критического угла до первого брэгговского пика. От параметров этого внешнего слоя не требовалось быть реалистичными, их задача – чтобы рассогласование измеренных и модельных кривых в области до первого пика не вносило значительного вклада в общую функцию невязки и тем самым не мешало поиску существенных параметров структуры – толщин и интерфейсов нижележащего стека. На рис. 4.5 приведены измеренные и смоделированные кривые отражения от всех образцов.

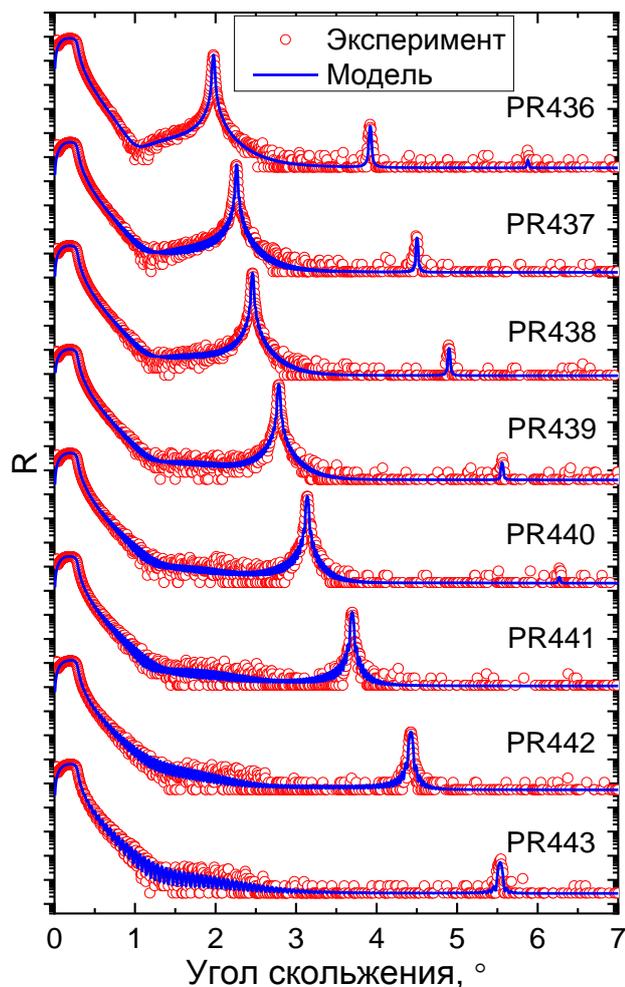


Рис. 4.5. Измеренные и смоделированные XRR кривые.

При моделировании мы считали среднеквадратичные толщины интерфейсов одинаковыми, $\sigma(\text{Cr-on-Be}) = \sigma(\text{Be-on-Cr})$, но профили диэлектрической проницаемости ε для интерфейсов отличались. Интерфейс Be-on-Cr описывался функцией erf (функция ошибок), а Cr-on-Be суммой функций erf + lin (функция ошибок + линейная функция). Конкретные выражения для этих функций можно увидеть в [104]. В таблице 4.1 приведены основные параметры структур, найденные с помощью подгонки.

Таблица 4.1. Основные параметры структур, найденные с помощью модельной подгонки. Неопределённость толщин периода составляет около $\pm 0,03 \text{ \AA}$, а ширины переходного слоя $\pm 0,5 \text{ \AA}$ (rms – среднеквадратичное отклонение неровностей от средней поверхности)

Образец	Период зеркала, \AA	Толщина Cr, \AA	Толщина Be, \AA	Переходной слой rms, \AA
PR436	22,6	9,8	12,8	4,10
PR437	19,7	8,4	11,3	4,10
PR438	18,1	7,7	10,4	3,95
PR439	15,9	6,8	9,1	3,80
PR440	14,1	6,1	8	3,75
PR441	12	5,2	6,8	3,55
PR442	10	4,4	5,6	3,35
PR443	8	3,4	4,6	3,3

Здесь важно отметить, что для интерфейса Cr-on-Be вес линейной функции относительно erf уменьшался от 1 для самого толстого образца PR436 до 0 для самого тонкого PR443. Поводом для того, чтобы для разных образцов использовать разные профили ϵ стала невозможность подгонки всех брэгговских пиков с одной стандартной функцией erf . Мы полагаем, что причиной изменений профиля диэлектрической проницаемости с уменьшением толщины пленок может стать трансформация микроструктуры пленок из-за возрастающей роли химического взаимодействия между слоями по мере уменьшения периода. Если при относительно больших периодах элементарная ячейка МЗ образована чистыми пленками Be и Cr и бериллидами с различным стехиометрическим составом на обеих границах, то по мере уменьшения толщин пленок чистые пленки полностью уступают место бериллидам. На это указывают результаты работы [A16], где методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было показано, что после периода 2 нм МЗ фактически состоит из CrBe_{12} со стороны границы Be-on-Cr, и из CrBe_2 на границе Cr-on-Be.

Среднеквадратическая толщина переходного слоя – не слишком наглядная величина в ситуации, когда она сравнима с номинальной толщиной слоёв; к тому же

она сильно зависит от вида функции, описывающей переход между материалами слоёв. Профиль ε непосредственно определяет отражение, поэтому на рис. 4.6 приведены профили диэлектрической проницаемости в сравнении друг с другом и с идеально резкой структурой. В качестве количественной характеристики профиля мы введём относительный оптический контраст:

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\delta\varepsilon_{\text{sharp}}} \quad (4.1)$$

Эта величина показывает, насколько уменьшился максимальный перепад ε в результате взаимопроникновения материалов слоёв. Можно также сказать, что это показатель того, какая «часть идеальной структуры» работает на отражение в первом порядке и, таким образом, контраст непосредственно связан с величиной первого брэгговского пика.

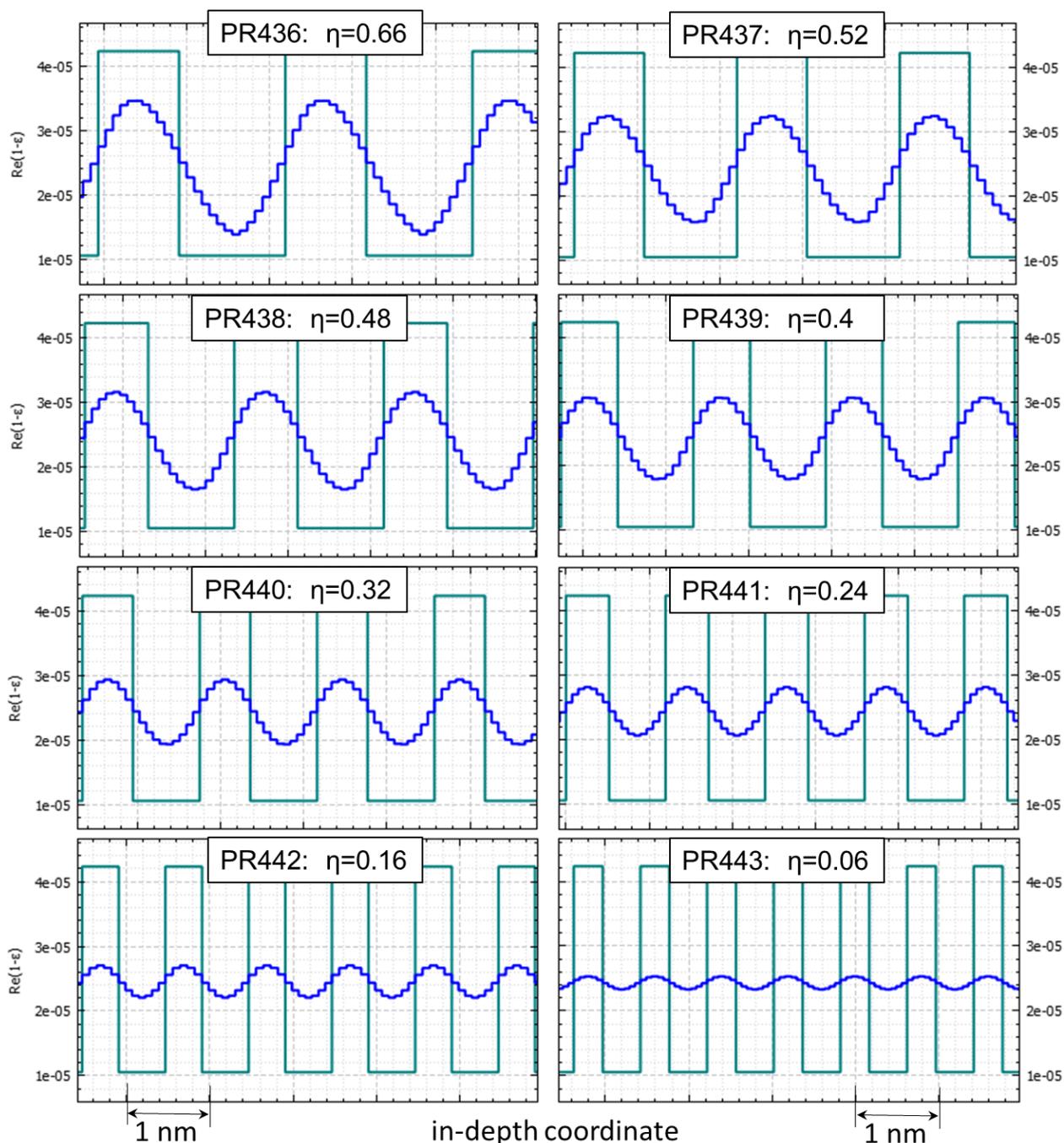


Рис. 4.6. Профили диэлектрической проницаемости образцов для длины волны 0,154 нм по рефлектометрическим данным. Величина контраста указана относительно идеально резкой структуры. Дискретизация соответствует той, что использовалась при моделировании.

Чтобы отделить шероховатость от перемешивания и найти её частотный спектр можно измерить диффузное рассеяние от образцов. Были получены кривые качания на угле Брэгга, индивидуальном для каждого образца. Этот тип измерений

был выбран из-за возможности увидеть рассеяние на значительный угол (несколько градусов от зеркального направления) при использовании лабораторного дифрактометра. Дело в том, что при выполнении условия конструктивной интерференции рассеяния на разных границах с коррелированной шероховатостью интенсивность рассеяния резко вырастает. Если пренебречь влиянием диэлектрической проницаемости ϵ на длину волны в веществе, то условие конструктивной интерференции будет выглядеть так: $d(\sin\theta_0 + \sin\theta) = m\lambda$, где θ_0 и θ – углы скольжения и рассеяния соответственно, d – период структуры, $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. Если $\theta = \theta_0$, то получается условие конструктивной интерференции отражения, или условие Брэгга.

Прежде чем приступать к количественному описанию рассеяния, стоит высказать общие соображения о свойствах шероховатости в МЗ. Шероховатость должна иметь частичную корреляцию между границами слоев: низкочастотная (или крупномасштабная) часть рельефа наследуется от предыдущей поверхности, а высокие пространственные частоты (соответствующие мелким латеральным масштабам) рельефа нарастают независимо от предшествующей границы, и между этими двумя крайними случаями будет частично коррелированная шероховатость с промежуточным пространственным спектром. По общим причинам глубина корреляции каждой пространственной частоты ν должна быть порядка $1/\nu$, но ее реальное значение может сильно зависеть от материалов слоя и условий осаждения, таких как температура, давление, энергия распыляющих частиц, ионная полировка и т.д. Тем не менее, благодаря малой толщине слоёв ~ 1 нм, межслоевая корреляция может проникать на несколько периодов даже для высоких пространственных частот рельефа, поэтому измерение рассеяния в режиме интерференционного усиления приводит к многократному увеличению сигнала и позволяет детектировать рассеяние на большие углы в лабораторных условиях.

Некоррелированный рост также означает, что величина среднеквадратичной шероховатости не определяется подложкой, особенно в ее высокочастотной части. Шероховатость может быть более гладкой или более грубой в зависимости от частоты, поэтому модель корреляционной функции, общей для всех границ и имеющей общую глубину взаимной корреляции для всех пространственных частот, как в работах [105, 106], выглядит по существу нефизическим. Даже если

корреляционные функции отдельных интерфейсов могут различаться [107], один параметр взаимной корреляции можно использовать только в ограниченном числе случаев. Точно так же модели с пространственно-частотно-зависимой глубиной корреляции, но с общей функцией корреляции интерфейса [108] не выглядят осуществимыми. Интересная модель была предложена в [109]: каждая граница раздела полностью наследует корреляционную функцию от подстилающей поверхности и добавляет к ней свою шероховатость. Среднеквадратичная шероховатость там нарастает от интерфейса к интерфейсу, что может выглядеть уместно для каких-то конкретных случаев, но явно не является универсальным законом.

На рис. 4.7 приведены измеренные и смоделированные кривые диффузного рассеяния для всех образцов. Видно, что заметный сигнал рассеяния имеет вид «наклонной полки» и продолжается в область малых углов скольжения до критического угла полного внешнего отражения.

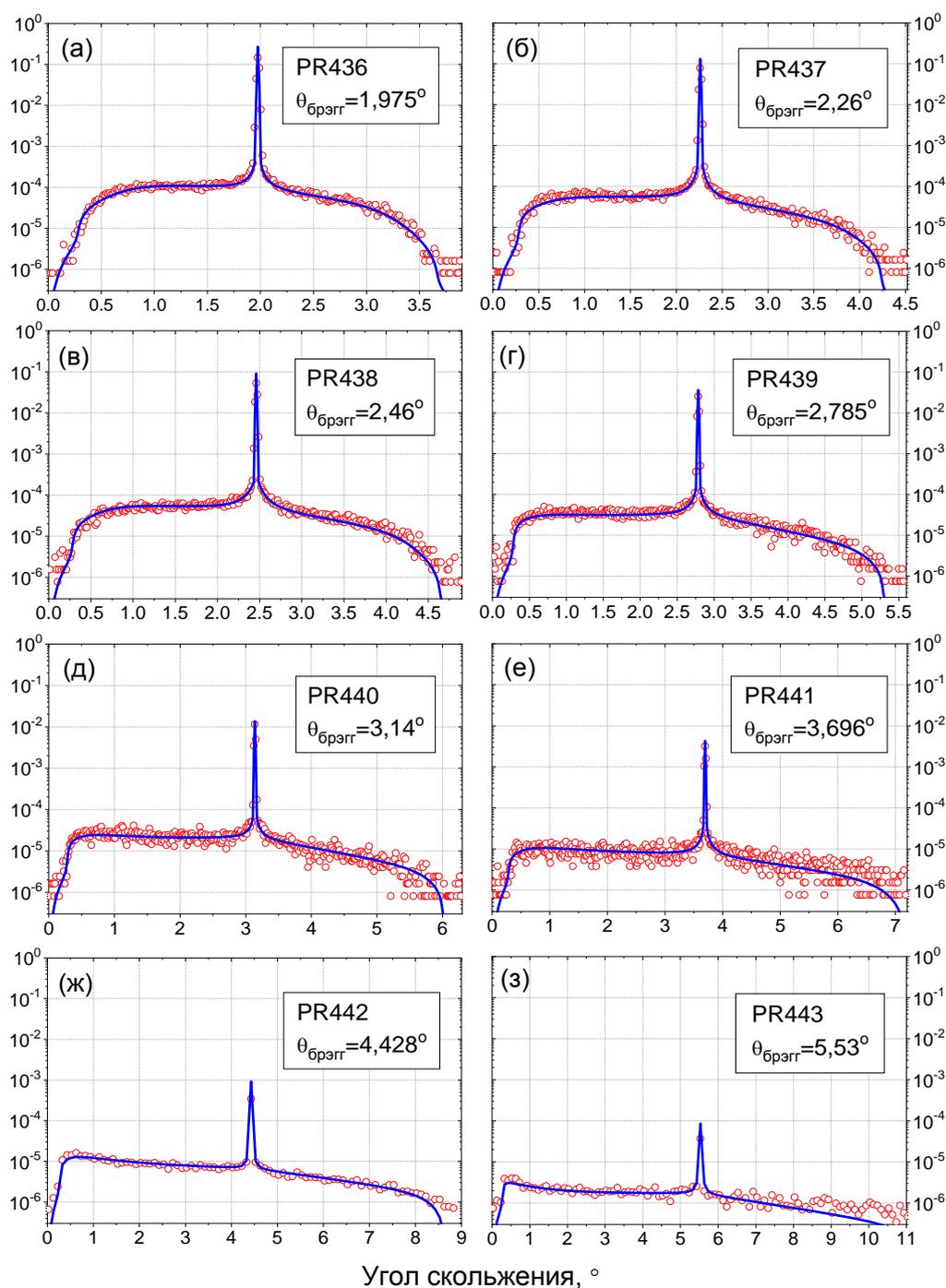


Рис. 4.7. Кривые качания образцов. Зеркальное положение для каждого образца соответствует первому брэгговскому пику. Кривые нормированы на интенсивность зондирующего пучка. Для измерений (а) – (е) приёмная щель детектора составляла 0,3 мм, для (ж) и (з) – 1 мм.

Шероховатость моделировалась в рамках линейной модели роста плёнок [28-31]. Спектр шероховатостей поверхности плёнки, выросшей на подложке имеет вид

$$PSD_{2D}(v) = PSD_{sub}(v)e^{-b(v)h} + \Omega \frac{1 - e^{-b(v)h}}{e^{-b(v)h}} \quad (4.2)$$

где $e^{-b(v)h}$ - фактор наследования, Ω – объём осаждаемой частицы (атома, молекулы или кластера), h – толщина плёнки, $b(v)$ – функция релаксации поверхности. Первое слагаемое соответствует унаследованной шероховатости, рассеяние на которой когерентно с рассеянием на нижележащем интерфейсе, а второе – собственной ростовой шероховатости. Функцию релаксации представляют в виде полинома по степеням пространственной частоты

$$b(v) = \sum_{n=1}^4 a_n v^n \quad (4.3)$$

Каждая степень полинома иногда сопоставляется физическому процессу [110, 111]. Иногда добавляют и нулевую степень частоты [112], но мы не будем рассматривать низкочастотную шероховатость, поэтому не включим этот член. Ростовые параметры для простоты считались одинаковыми для Cr и Be.

В отличие от ростовой шероховатости слоёв, исходная шероховатость подложки обладает большим корреляционным радиусом и приводит к рассеянию на малые углы. Так как кривые зеркального отражения были измерены с широкой приёмной щелью детектора (0,8 мм), то низкочастотная часть шероховатости ($v < 0,1 - 1 \text{ мкм}^{-1}$) не влияет на отражение [113]. На картине рассеяния низкие частоты определяют ближайшую окрестность зеркального пика ($< 0,1^\circ$ от зеркального направления), которая нас в данной работе не интересует и не была детально промерена. Из всего этого следует, что для моделирования кривых отражения (рис. 4.1) и кривых качания (рис. 4.3) достаточно работать с высокочастотной частью PSD, что упрощает моделирование.

Влияние шероховатости на зеркальное отражение учитывалось с помощью фактора

$$\exp\left[\left(\frac{4\pi\sigma_{eff}\sin\theta_0}{\lambda}\right)^2\right], \quad (4.4)$$

$$\sigma_{eff}^2 = \int_{\nu_{min}}^{\infty} PSD_{1D}(\nu) d\nu$$

где σ_{eff} – величина шероховатости, рассеяние на которой не попадает в приёмную щель детектора.

В результате подгонки параметров шероховатости были получены $PSD_{2D}(\nu)$ на каждом интерфейсе структур, в том числе на поверхности. На рис. 4.8 приведены графики $PSD_{2D}(\nu)$ поверхности. Поскольку нашей задачей является исследования ростовых свойств Ст/Ве зеркал, то интерес вызывает сравнение чисто ростовых PSD, без шероховатости подложки. Но чтобы проиллюстрировать вклад подложки в формирование шероховатой поверхности и разделить диапазон пространственных частот на области, в которых доминируют либо подложка, либо собственные ростовые процессы, приведены PSD «крайних» образцов PR436 и PR443 с учётом подложки. Они обозначены красным и чёрным пунктиром соответственно.

Можно отметить следующие тенденции. Во-первых, с уменьшением периода структуры уменьшается и PSD в своей низкочастотной области. Частично это связано с тем, что у структур отличается полная толщина плёнки, а при уменьшении частоты ростовая PSD становится пропорциональна толщине покрытия: $\nu \rightarrow 0 \Rightarrow PSD \rightarrow \Omega h$. Это может объяснить спадание в 3 раза для тонкой плёнки относительно толстой, но не в 30 раз, как это следует из рис. 4.4. При моделировании рассеяния вслед за уменьшением периода структуры приходилось также уменьшать параметр Ω , чтобы сохранить форму кривой качания в виде «плоской наклонной полки» на рис. 4.3.

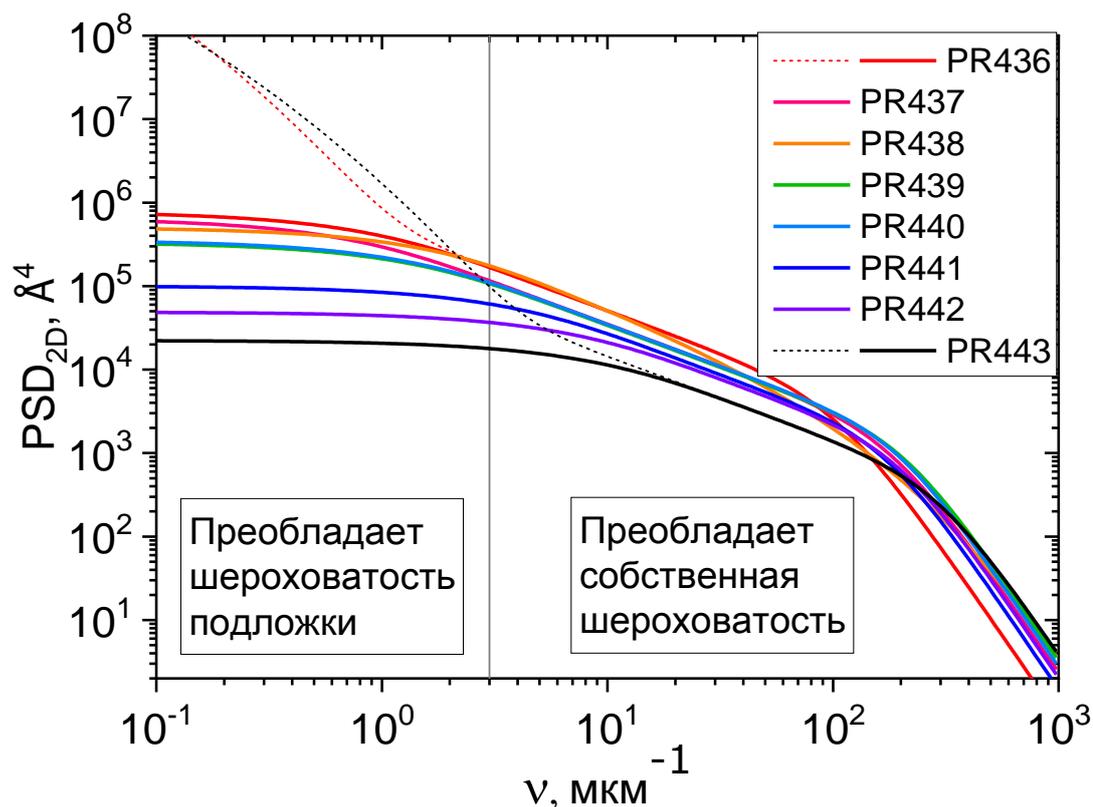


Рис. 4.8. Ростовые PSD_{2D} поверхности образцов. Пунктиром обозначены PSD с учётом шероховатости подложки для образца PR436 (красный) и PR443 (чёрный).

С учётом физического смысла Ω как объёма осаждаемых частиц можно проинтерпретировать его рост с увеличением толщины слоёв как кластеризацию частиц. Здесь возможна аналогия с образованием кристаллитов Mo в Mo/Si многослойных структурах при толщине Mo > 2 нм [114], однако, тут идёт речь о толщинах 0,5–1 нм.

Во-вторых, PSD почти всех образцов выходят на достаточно схожие высокочастотные асимптотики, определяемые степенью $n=4$ в выражении (4.3). Эти высокочастотные хвосты PSD функции оказывают влияние на кривые отражения и рассеяния опосредованным образом, находясь под знаком интеграла. Для XRR они влияют на σ_{eff} в выражении (4.4), для XRDS азимутально рассеянное на этих частотах излучение также интегрируется щелевым детектором. Поскольку столь высокочастотная часть PSD не наблюдается напрямую, она гораздо более неоднозначна и спекулятивна в интерпретации, поэтому было бы более корректным задать одинаковое для всех образцов асимптотическое поведение PSD.

Ещё одно важное обстоятельство, про которое нельзя забывать, интерпретируя результаты численного моделирования, – это применимость используемых приближений. Для расчёта рассеяния на шероховатых интерфейсах в программе Multifitting [102] была применена пертурбативная теория [115]. Она позволяет сравнительно простым образом использовать автокорреляционные и кросскорреляционные PSD интерфейсов для расчёта, но её применимость ограничивается условиями для углов скольжения падающего и рассеянного излучения:

$$k\sigma \sin \theta \ll 1, \quad k\sigma \sin \theta_0 \ll 1 \quad (4.5)$$

В наших измерениях (рис. 4.3) максимальный угол падающего или рассеянного излучения составляет от $3,5^\circ$ для образца PR436 до $10,5^\circ$ для образца PR443. Чтобы условие (4.5) выполнялось во всём диапазоне углов качания, среднеквадратичная шероховатость должна быть менее $1,5 \text{ \AA}$ для PR436 и менее $0,5 \text{ \AA}$ для PR443. Для выполнения условия применимости вблизи зеркального пика, где угол падения/рассеяния минимален, допустимая шероховатость может быть в два раза больше, 3 \AA и 1 \AA соответственно. Ростовая шероховатость, полученная интегрированием PSD функций с рис. 4.4 начиная с частоты 10^{-4} \AA^{-1} ($=1 \text{ мкм}^{-1}$), приведена в таблице 4.2. Она составляет около 2 \AA для всех образцов, что означает выход за пределы применимости теории возмущений по высоте шероховатостей почти во всех случаях. Возможно, ещё более существенно то, что с уменьшением периода структуры и связанной с этим необходимостью увеличивать углы θ и θ_0 мы выходим за условие (4.5) всё дальше, что ставит под вопрос не только правильность найденных параметров, но и корректность сравнения образцов между собой. В качестве референсных данных шероховатости мы взяли измерения AFM по кадру размером 2 мкм , они также приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Параметры интерфейсов. Шероховатость образцов, получена по данным XRDS (начиная с частоты 1 мкм^{-1} и выше) и AFM (кадр 2 мкм). Ширина переходного слоя получена при одновременном учёте шероховатости. В скобках указан примерный разброс значений по результатам нескольких подгонок.

Образец	Шероховатость AFM, Å	Шероховатость XRDS, Å ($\pm 0,4 \text{ Å}$)	Переходной слой rms, Å ($\pm 0,7 \text{ Å}$)
PR436	1,22	1,97	3,1
PR437	-	2,16	3,3
PR438	1,44	2	3,4
PR439	-	2,25	3,3
PR440	0,95	2,05	3
PR441	-	1,88	3,3
PR442	1,05	1,9	3,3
PR443	1,4	1,75	3

Шероховатость AFM заметно ниже, чем найденная по моделированию XRDS. Это может быть связано с низкой чувствительностью нашего AFM к мелкомасштабному рельефу с частотой $>30 \text{ мкм}^{-1}$, выявленной по тестам с шумом [39]. Тем не менее, несмотря на это, а также на разброс данных по образцам, не наблюдается явной тенденции на увеличение или уменьшение шероховатости в зависимости от периода. И это находится в полном соответствии с результатами RDS.

Поскольку рассеяние и отражение моделировались одновременно, то кроме PSD функций и соответствующей интегральной шероховатости была получена характерная величина размыва границ, она также приведена в таблице 4.2. Оно оказалось также примерно на одном уровне для всех образцов, при этом в отличие от результатов в таблице 4.1 здесь не удалось найти единый подход для описания профиля ϵ , поэтому неопределённость в способе моделирования привела к значительно большей неопределённости в значениях rms. Данные из таблицы 4.2 для наглядности приведены на рис. 4.9.

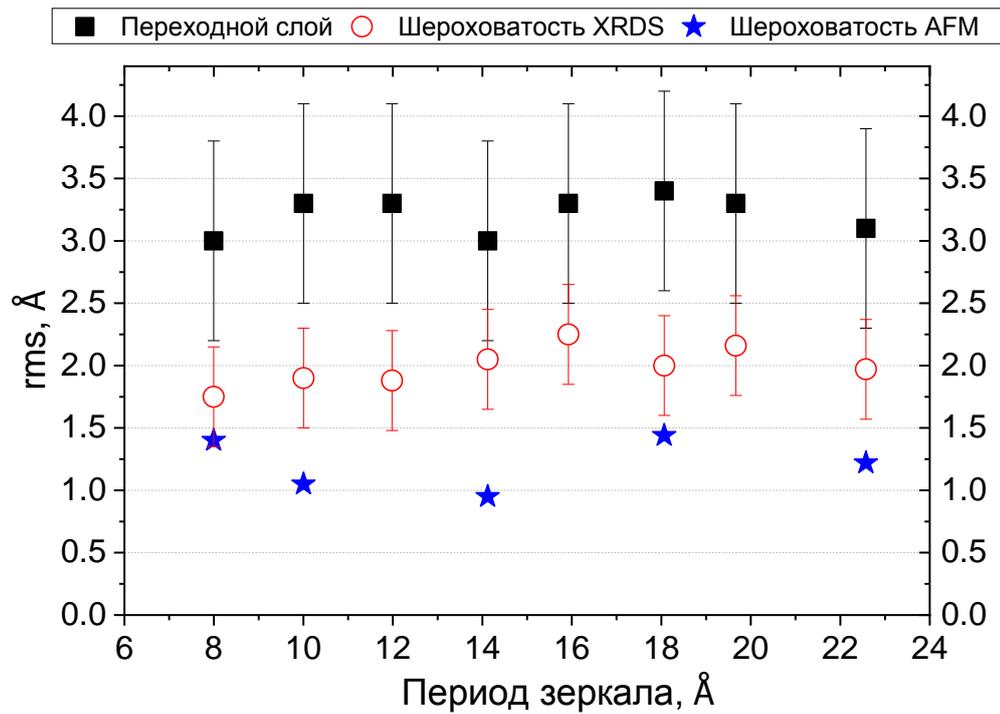


Рис. 4.9. Шероховатости и эффективные ширины интерфейсов в зависимости от периода структуры. Данные из таблицы 4.2.

Как и для чисто рефлектометрического моделирования (рис. 4.6) на рис. 4.10 приведены профили и контраст ϵ .

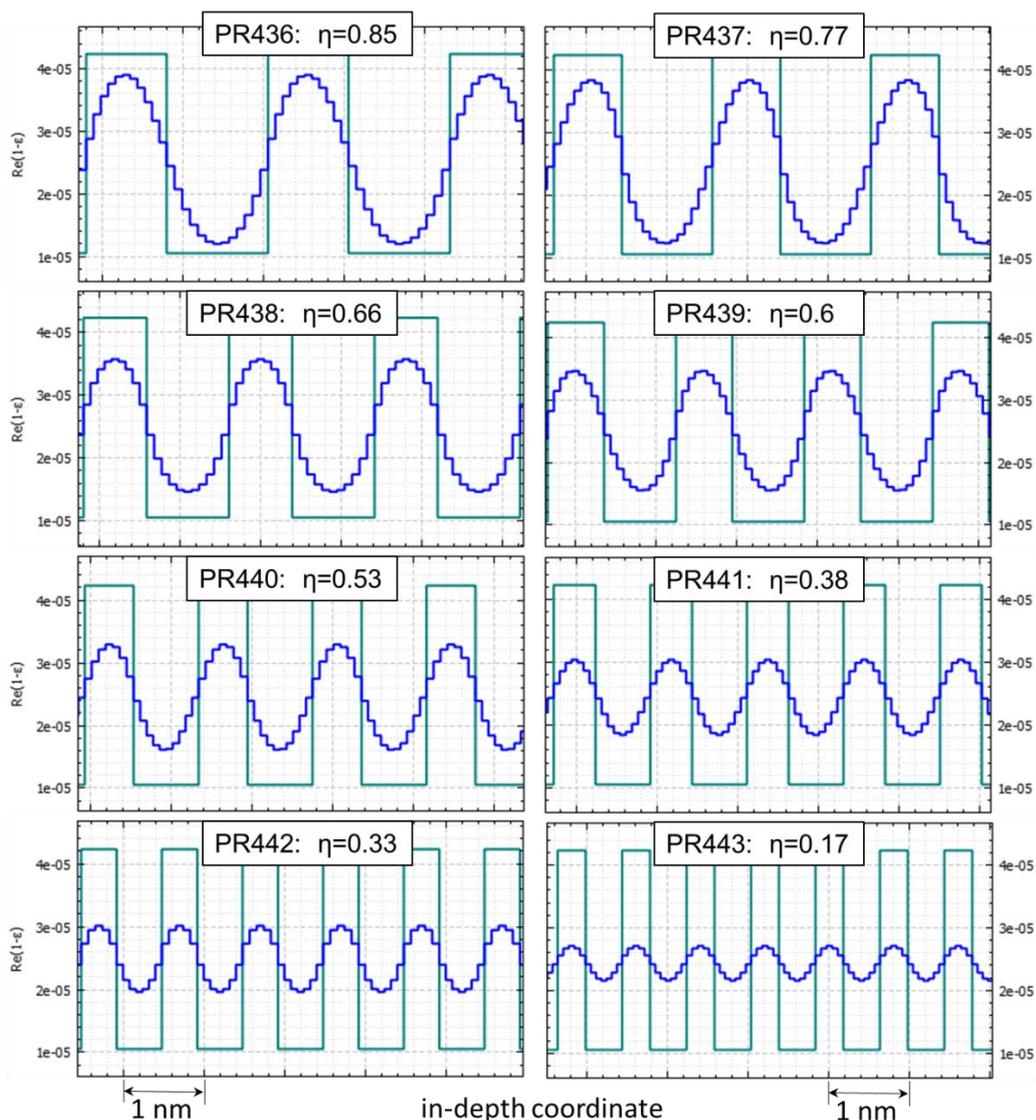


Рис. 4.10. Профили диэлектрической проницаемости образцов, восстановленные по данным рентгеновского отражения на длине волны 0,154 нм.

Величина контраста указана относительно идеально резкой структуры.

Дискретизация соответствует той, что использовалась при моделировании.

Таким образом, изучена внутренняя структура и произведено сравнение между собой 8 образцов Cr/Ве многослойных зеркал с периодами от 2,26 до 0,8 нм. Такая сравнительно длинная серия была выбрана для того, чтобы увидеть внутрискруктурные тенденции, связанные с экстремальным уменьшением толщины основных слоёв. Структуры со сверхмалыми периодами могут быть очень полезны при разработке фокусирующих и коллимирующих рентгенооптических элементов, но при это они не должны приводить к загрязнению рабочего пучка рассеянным излучением. Чтобы проследить динамику шероховатости в Cr/Ве структурах

использованы методы XRR и XRDS позволяющие разделить рассеивающую шероховатость и перемешивание материалов слоёв, приводящее к снижению оптического контраста. Количественные оценки были получены с помощью численного моделирования отражения и рассеяния от многослойных структур. Для этого профиль диэлектрической проницаемости представлялся в виде однородных слоёв Cr и Be с плавным переходом между ними. Для повышения точности расчёта профиль ϵ разбивался на тонкие подслои. Для моделирования рассеяния на частично коррелированных шероховатостях интерфейсов мы воспользовались модельным выражением PSD функции для растущей поверхности и теорией возмущений по высоте шероховатостей, позволяющей получить индикатрису рассеяния непосредственно из PSD. Чтобы верифицировать результат расчёта, проведены AFM измерения части образцов и сравнили rms шероховатостей для внешней поверхности зеркал.

В результате можно сделать следующие выводы. В диапазоне толщин периодов 2,26 – 0,8 нм величина ростовой шероховатости Cr/Be зеркал не зависит от толщины периода и, в данном случае, составляет 2 Å [A18]. Следует ещё раз отметить, что этот результат является наблюдаемым трендом (а точнее, его отсутствием для шероховатости) и существенно базируется на наблюдении большого (восемь) количества образцов с постепенно изменяющимся периодом. Установить подобную зависимость, изучив любые два-три образца в рамках нашей методики не представляется возможным из-за сильной корреляции параметров численной модели и связанной с этим неоднозначности получаемых значений. Выделение шероховатости позволяет оценить взаимопроникновение материалов слоёв и обусловленное этим падение оптического контраста, наиболее резкое при толщине периода <1 нм.

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/V₄C M3 [92], может быть объяснено сильным химическим взаимодействием между слоями, что так же подтверждается данными рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [A16].

С точки зрения рентгенооптических приложений, важнейшим результатом исследования стало определение численных значений протяженности переходного

слоя и статистических свойств шероховатостей границ, позволяющие предсказать рентгенооптические характеристики Cr/Be МЗ в широком диапазоне периодов и длин волн. В частности, полученные значения протяженности переходного слоя на уровне 0,3–0,4 нм хоть и уступают значениям W/W₄C МЗ, тем не менее, в жестком рентгеновском диапазоне длин волн при периоде более 2 нм Cr/Be МЗ не уступают им по коэффициенту отражения, при этом существенно превосходя их по спектральному разрешению. Таким образом, Cr/Be является крайне перспективной системой для синхротронных приложений при решении задач, где требуется спектральная селективность $\Delta E/E < 1\%$.

4.3. Основные результаты главы 4

В главе 4 получены следующие важнейшие результаты:

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

2. Предложены, синтезированы и изучены структурные параметры короткопериодных Cr/Be 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.

3. На основе W/Be МЗ были изготовлены комплекты зеркал для двухзеркального монохроматора синхротрона ВЭПП-4 [A4, A7]. Проведена оценка перспектив использования Cr/Be МЗ для синхротронных приложений для монохроматизации рентгеновских пучков.

По результатам главы 4 опубликованы следующие работы: [A4], [A16], [A18], [A20], [A22] и [A23].

Основные результаты

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 Mo/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 Be/Al многослойных зеркал, оптимизированных на диапазон длин волн 17,1–30,4 нм. На длине волны 17,1 нм на структуре Be/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 Be/Al в диапазоне толщин Al 4–15 нм. Показана высокая временная стабильность этих структур.

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

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

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

6. Предложены, синтезированы и изучены структурные параметры короткопериодных Si/Be 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 Si/Be МЗ для синхротронных приложений для монохроматизации рентгеновских пучков.

Литература

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. Виноградов, А. В. Зеркальная рентгеновская оптика / А. В. Виноградов, И. А. Брытов, Ф. Я. Грудский, М. Т. Коган, И. В. Кожевников, В. А. Слемзин; под общей ред. А. В. Виноградова. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 463 с.
3. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. С. Н. Бреуса и др., под ред. Г. П. Мотулевича. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
4. CXRO X-Ray Interactions With Matter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html.
5. Бернинг, П.Х. Физика тонких пленок. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок / П. Х. Бернинг; пер. с англ. А. Г. Ждана и др., под общ. ред. Г. Хасса. – М.: Мир, 1967. – С. 91–151.
6. Виноградов, А. В. О многослойных зеркалах для рентгеновского и далекого ультрафиолетового диапазона / А. В. Виноградов, Б. Я. Зельдович // *Оптика и спектроскопия*. – 1977. – Т. 42. – № 4. – С. 709–714.
7. Wang, D. Li K-edge X-ray absorption near edge structure spectra for a library of lithium compounds applied in lithium batteries / D. Wang, L. Zuin // *Journal of Power Sources*. – 2017. – V. 337. – P. 100–109.
8. O'Shaughnessy, C. A Li K-edge XANES study of salts and minerals / C. O'Shaughnessy, G. S. Henderson, B. J. A. Moulton, L. Zuin, D. R. Neuville // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2018. – V. 25. – №. 2. – С. 543–551.
9. Spiller, E. High-performance multilayer coatings for EUV lithography / E. Spiller // *Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications*. – SPIE, 2004. – V. 5193. – P. 89-97.
10. Svechnikov, M. V. Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography / M. V. Svechnikov, N. I.

- Chkhalo, S. A. Gusev, A. N. Nechay, D. E. Pariev, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, D. A. Tatarskiy, N. N. Salashchenko, F. Schäfers, M. G. Sertsu, A. Sokolov, Y. A. Vainer, M. V. Zorina // *Optics Express*. – 2018. – V. 26. – №. 26. – P. 33718-33731.
11. Блохин, М. А. Физика рентгеновских лучей / М. А. Блохин; под. ред. Е. Б. Кузнецова. – М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1953. – 456 с.
 12. Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://thesis.xras.ru/sun_vocabulary.html.
 13. Reeves, K. K. Hot plasma flows and oscillations in the loop-top region during the 2017 September 10 X8. 2 solar flare / K. K. Reeves, V. Polito, B. Chen, G. Galan, S. Yu, W. Liu, G. Li // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – V. 905. – №. 2. – P. 165.
 14. 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.
 15. Житник, И. А. Эффекты поглощения солнечного XUV-излучения верхней атмосферой земли на высотах 100-500 км в рентгеновских изображениях солнца, полученных на спутниках КОРОНАС-Ф (телескоп ТЕРЕК) и КОРОНАС-Ф (рентгеновский комплекс СПИРИТ) / И. А. Житник, К. А. Боярчук, О. И. Бугаенкой др. // *Астрономический вестник*. – 2003. – Т. 37. – №. 4. – С. 325–331.
 16. Acton, L. The Yohkoh mission for high-energy solar physics / L. Acton, M. Bruner, J. Lemen et al. // *Science*. – 1992. – V. 258. – №. 5082. – P. 618–625.
 17. Ораевский, В. Н. Комплексные исследования активности Солнца на спутнике КОРОНАС-Ф / В. Н. Ораевский, И. И. Собельман // *Письма в Астрономический журнал*. – 2002. – Т. 28. – №. 6. – С. 457–467.
 18. Domingo, V. The SOHO mission: an overview/ V. Domingo, B. Fleck, A. I. Poland // *Solar Physics*. – 1995. – V. 162. – №. 1. – P. 1–37.
 19. Handy, B. The transition region and coronal explorer / B. Handy, L. Acton, C. Kankelborg et al. // *Solar Physics*. – 1999. – V. 187. – P. 229–260.
 20. Kotov, Yu. D. Satellite project CORONAS-PHOTON for study of solar hard radiation / Yu. D. Kotov et al. // *35th COSPAR Scientific Assembly*. – 2004. – V. 35. – P. 1283.

21. Kuzin, S. V. The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft / S.V. Kuzin, I.A. Zhitnik, S. V. Shestov et al. // *Solar System Research*. – 2011. – V. 45. – №. 2. – P. 162–173.
22. Zank, G. P. Turbulence transport in the solar corona: Theory, modeling, and Parker Solar Probe / G. P. Zank, L.-L. Zhao, L. Adhikari, D. Telloni, J. C. Kasper, S. D. Bale // *Physics of Plasmas*. – 2021. – V. 28. – №. 8. – P. 080501.
23. Müller, D. Solar Orbiter / D. Müller, R. G. Marsden, O. C. St. Cyr et al. // *Solar Physics*. – 2013. – V. 285. – P. 25–70.
24. Rochus, P. The solar orbiter EUVI instrument: The extreme ultraviolet imager / P. Rochus, F. Auchère, D. Berghmans et al. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2020. – V. 642. – P. A8
25. 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.
26. Сомов, Б. В. Магнитное пересоединение в солнечных вспышках / Б. В. Сомов // *Успехи физических наук*. – 2010. – Т. 180. – №. 9. – С. 997-1000.
27. CubeSat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cubesat.org>.
28. Кузин, С. В. Солнечный телескоп вакуумного ультрафиолетового диапазона для наноспутников / С. В. Кузин, С. А. Богачев, Н. Ф. Ерхова и др. // *Журнал технической физики*. – 2021. – Т. 91. – №. 10. – С. 1441–1447.
29. Mason, J. P. Miniature X-ray solar spectrometer: A science-oriented, university 3U CubeSat / J. P. Mason, T. N. Woods, A. Caspi, P. C. Chamberlin, C. Moore, A. Jones, R. Kohnert, X. Li, S. Palo, S. C. Solomon // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2016. – V. 53. – №. 2. – P. 328–339.
30. Гончаров, Н. В. «Ярило» – проект построения группировки наноспутников для исследования Солнца / Н. В. Гончаров, М. Ю. Корецкий, В. И. Майорова и др. // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2018. – №. 1. – С. 69–78.
31. 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.
32. Кузин, С. В. Рентгеновская изображающая спектроскопия солнечной короны в проекте КОРОНАС: создание аппаратуры и астрофизические результаты:

- диссертация доктора физико-математических наук: 01.03.02. – Москва, 2010. – 440 с.
33. Kirichenko, A. S. Long-duration plasma heating in solar microflares of X-ray class A1. 0 and lower / A. S. Kirichenko, S. A. Bogachev // *Astronomy Letters*. – 2013. – V. 39. – №. 11. – P. 797–807.
 34. 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.
 35. Antonucci, E. Multi element telescope for imaging and spectroscopy (METIS) coronagraph for the Solar Orbiter Mission / E. Antonucci, S. Fineschi, G. Naletto et al. // *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray*. – SPIE, 2012. – V. 8443. – P. 68–79.
 36. 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.
 37. Meltchakov, E. EUV reflectivity and stability of tri-component Al-based multilayers / E. Meltchakov, A. Ziani, F. Auchere, X. Zhang, M. Roulliay, S. DeRossi, Ch. Bourassin-Bouchet, A. Jérôme, F. Bridou, F. Varniere, F. Delmotte // *Advances in Optical Thin Films IV*. – SPIE, 2011. – V. 8168. – P. 293–301.
 38. Hu, M. H. Structural properties of Al/Mo/SiC multilayers with high reflectivity for extreme ultraviolet light / M. H. Hu, K. Le Guen, J. M. André, P. Jonnard, E. Meltchakov, F. Delmotte, A. Galtayries // *Optics Express*. – 2010. – V. 18. – №. 19. – P. 20019–20028.
 39. Soufli R., Development and testing of EUV multilayer coatings for the atmospheric imaging assembly instrument aboard the Solar Dynamics Observatory / R. Soufli, D. L. Windt, J. C. Robinson, S. L. Baker, E. Spiller, F. J. Dollar, A. L. Aquila, E. M. Gullikson, B. Kjornrattanawanich, J. F. Seely, L. Golub // *Solar Physics and Space Weather Instrumentation*. – SPIE, 2005. – V. 5901. – P. 173–183.
 40. Зуев, С. Ю. Элементы отражающей оптики для решения задач рентгеновской астрофизики в рамках эксперимента ТЕСИС / С. Ю. Зуев, С. В. Кузин, В. Н.

- Полковников, Н. Н. Салашченко // Известия РАН. Серия физическая. – 2010. – Т.74. – №.1. – С. 58–61.
41. Bogachev, S. A. Advanced materials for multilayer mirrors for extreme ultraviolet solar astronomy / S. A. Bogachev, N. I. Chkhalo, S. V. Kuzin, D. E. Pariev, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, S. V. Shestov, S. Y. Zuev // *Applied Optics*. – 2016. – V. 55. – №. 9. – P. 2126–2135.
42. Zuppella, P. Innovative multilayer coatings for space solar physics: performances and stability over time / P. Zuppella, A. J. Corso, P. Nicolosi, D. L. Windt, M. G. Pelizzo // *Euv and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space II*. – SPIE, 2011. – V. 8076. – P. 76–83.
43. Aquila, A. Tri-material multilayer coatings with high reflectivity and wide bandwidth for 25 to 50 nm extreme ultraviolet light / A. Aquila, F. Salmassi, Y. Liu, E. M. Gullikson // *Optics Express*. – 2009. – V. 17. – №. 24. – P. 22102–22107.
44. Zhu, J. Comparison of Mg-based multilayers for solar He II radiation at 30.4 nm wavelength / J. Zhu, S. Zhou, H. Li, Q. Huang, Z. Wang, K. Le Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, P. Jonnard // *Applied Optics*. – 2010. – V. 49. – №. 20. – P. 3922–3925.
45. Martínez-Galarce, D. S. Multisegmented, multilayer-coated mirrors for the Solar Ultraviolet Imager / D. S. Martínez-Galarce, R. Soufli, D. L. Windt et al. // *Optical Engineering*. – 2013. – V. 52. – №. 9. – P. 095102-1–095102-15.
46. Ignatiev, A. Manufacture and testing of X-ray optical elements for the TEREK-C and RES-C instruments (the «CORONAS-I» mission) / A. Ignatiev, N. Kolachevsky, V. Slemzin et al. // *Current Russian Research in Optics and Photonics: New Methods and Instruments for Space-and Earth-based Spectroscopy in XUV, UV, IR, and Millimeter Waves*. – SPIE, 1998. – V. 3406. – P. 20–34.
47. Windt, D. L. Multilayer films for figured x-ray optics / D. L. Windt // *Crystal and Multilayer Optics*. – SPIE, 1998. – V. 3448. – P.280–290.
48. Windt, D. L. Performance, structure, and stability of SiC/Al multilayer films for extreme ultraviolet applications / D. L. Windt, J. A. Bellotti // *Appl. Opt.* – 2009. – V.48. – №.26. – P. 4932–4941.
49. Jonnard, P. Optical, chemical and depth characterization of Al/SiC periodic multilayers / P. Jonnard, K. Le Guen, M.-H. Hu, J.-M. André, E. Meltchakov, C.

- Hecquet, F. Delmotte, A. Galtayries // EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space. – SPIE, 2009. – V.7360. – P. 73600O-1–73600O-9.
50. Meltchakov, E. Development of Al-based multilayer optics for EUV / E. Meltchakov, C. Hecquet, M. Roulliay, S. De Rossi, Y. Menesguen, A. Jérôme, F. Bridou, F. Varniere, M.-F. Ravet-Krill, F. Delmotte // Appl. Phys. A. – 2010. – V.98. – P. 111–117.
51. Galtayries, A. Nanometer-designed Al/SiC periodic multilayers: characterization by a multi-technique approach / A. Galtayries, M.-H. Hu, K. Le Guen, J.-M. André, P. Jonnard, E. Meltchakov, C. Hecquet, F. Delmotte // Surface and Interface Analysis. – 2010. – V.42. – №.6-7. – P.653–657.
52. Nii, H. Fabrication of Mo/Al multilayer films for a wavelength of 18.5 nm / H. Nii, M. Niibe, H. Kinoshita, Y. Sugie // J. Synchrotron Radiat. – 1998. – V.5. – №.3. – P.702–704.
53. Nii, H. Control of Roughness in Mo/Al Multilayer Film Fabricated by DC Magnetron Sputtering / H. Nii, M. Miyagawa, Y. Matsuo, Y. Sugie, M. Niibe, H. Kinoshita // Jpn. J. Appl. Phys. – 2002. – V.41. – №. 8R. – P. 5338–5341.
54. Corso, A. J. Capped Mo/Si multilayers with improved performance at 30.4 nm for future solar missions / A. J. Corso, P. Zuppella, P. Nicolosi, D. L. Windt, E. Gullikson, M. G. Pelizzo // Optics Express. – 2011. – V. 19. – №. 15. – P. 13963–13973.
55. Meltchakov, E. Single and multi-channel Al-based multilayer systems for space applications in EUV range / E. Meltchakov, S. De Rossi, R. Mercier, F. Varniere, A. Jérôme, F. Auchere, X. Zhang, M. Roulliay, F. Delmotte // Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics IV; and EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space III. – SPIE, 2013. – V. 8777. – P. 288–296.
56. Pelizzo, M. G. Long-term stability of Mg/SiC multilayers / M. G. Pelizzo, A. J. Corso, P. Zuppella, P. Nicolosi, S. Fineschi, J. F. Seely, B. Kjornrattanawanich, D. L. Windt // Optical Engineering. – 2012. – V. 51. – №. 2. – P. 023801.
57. Li, H. Mg/B4C EUV multilayer by introducing Co as barrier layer / H. Li, S. Zhou, Q. Huang, M. Tan, L. Jiang, J. Zhu, X. Wang, F. Wang, Z. Zhang, Z. Wang, L. Chen // Seventh International Conference on Thin Film Physics and Applications. – SPIE, 2011. – V. 7995. – P. 231–234.

58. Bogachev, S. A. Advanced materials for multilayer mirrors for extreme ultraviolet solar astronomy / S. A. Bogachev, N. I. Chkhalo, S. V. Kuzin, D. E. Pariev, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, S. V. Shestov, S. Y. Zuev // *Applied Optics*. – 2016. – V. 55. – №. 9. – P. 2126–2135
59. Soufli, R. Corrosion-resistant Mg/SiC multilayer coatings for EUV laser sources in the 25-80nm wavelength region / R. Soufli, M. Fernández-Perea, J. C. Robinson, S. L. Baker, J. Alameda, C. C. Walton, L. Rodríguez-DeMarcos, J. A. Méndez, J. I. Larruquert, M. Vidal-Dasilva, E. M. Gullikson // *X-Ray Lasers and Coherent X-Ray Sources: Development and Applications X*. – SPIE, 2013. – V. 8849. – P. 54–60.
60. Liu, J. C. A Reliability Enhanced 5nm CMOS Technology Featuring 5th Generation FinFET with Fully-Developed EUV and High Mobility Channel for Mobile SoC and High Performance Computing Application / J. C. Liu, S. Mukhopadhyay, A. Kundu et al. // *2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. – IEEE, 2020. – P. 9.2.1–9.2.4.
61. Yeap, G. 5nm CMOS production technology platform featuring full-fledged euv, and high mobility channel FinFETs with densest 0.021 μm^2 SRAM cells for mobile soc and high performance computing applications / G. Yeap, S. S. Lin, Y. M. Chen et al. // *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. – IEEE, 2019. – P. 36.7.1–36.7.4.
62. 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.
63. Petford-Long, A. K. High-resolution electron microscopy study of x-ray multilayer structures / A. K. Petford-Long // *Journal of applied physics*. – 1987. – V. 61. – №. 4. – P. 1422–1428.
64. Rosen, R. S. Silicide layer growth rates in Mo/Si multilayers / R. S. Rosen, S. P. Vernon, G. Stearns, M. A. Viliardos, M. E. Kassner, S. P. Vernon, Y. Cheng // *Applied optics*. – 1993. – V. 32. – №. 34. – P. 6975–6980.
65. Slaughter, J. M. Interfaces in Mo/Si multilayers / J. M. Slaughter, P. A. Kearney, D. W. Schulze, C. M. Falco, C. R. Hills, E. B. Saloman, R. N. Watts // *X-Ray/EUV*

- Optics for Astronomy, Microscopy, Polarimetry, and Projection Lithography. – SPIE, 1991. – V. 1343. – P. 73–82.
66. Slaughter, J. M. Structure and performance of Si/Mo multilayer mirrors for the extreme ultraviolet / J. M. Slaughter, D. W. Schulze, C. R. Hills, A. Mirone, R. Stalio, R. N. Watts, C. Tarrío, T. B. Lucatorto, M. Krumrey, P. Mueller, C. M. Falco // *Journal of applied Physics*. – 1994. – V. 76. – №. 4. – P. 2144–2156.
67. Stearns, D. G. Multilayer mirror technology for soft-x-ray projection lithography / D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon // *Applied Optics*. – 1993. – V. 32. – №. 34. – P. 6952–6960.
68. Andreev, S. S. The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers / S. S. Andreev, S. V. Gaponova, S. A. Gusev et al. // *Thin Solid Films*. – 2002. – V. 415. – №. 1-2. – P. 123–132.
69. Braun, S. Mo/Si multilayers with different barrier layers for applications as extreme ultraviolet mirrors / S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson // *Japanese journal of applied physics*. – 2002. – V. 41. – №. 6S. – C. 4074–4081.
70. 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.
71. 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.
72. Гаврилов, Н. Г. Двухзеркальный монохроматор ультрамягкого рентгеновского диапазона станции метрологии ВЭПП-2М с использованием многослойных зеркал / Н. Г. Гаврилов, А. А. Легкодымов, А. Д. Николенко, В. Ф. Пиндюрин, В. А. Чернов, А. Н. Субботин // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2000. – № 1. – С. 129–131.
73. Chkhalo, N. I. Status of X-ray Mirror Optics at the Siberian SR Centre / N. I. Chkhalo, M. V. Fedorchenko, N. V. Kovalenko, E. P. Kruglyakov, A. I. Volokhov, V. A. Chernov, S. V. Mytnichenko // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. – 1995. – V. 359. – P. 121–126.

74. Кругляков, Э. П. Спектрометры на основе многослойных рентгеновских зеркал для диагностики высокотемпературной плазмы / Э. П. Кругляков, А. Д. Николенко, Е. П. Семенов, Е. Д. Чхало, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 1999. – № 1. – С. 151–154.
75. Николенко А. Д. Станция «Космос». Использование синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4 для метрологических измерений в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах / А. Д. Николенко, С. В. Авакян, И. М. Афанасьев, Н. А. Воронин, Н. В. Коваленко, А. А. Легкодымов, В. В. Лях, В. Ф. Пиндюрин // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2012. – № 5. – С. 13.
76. Montcalm, C. Survey of Ti-, V-, and Y-based soft x-ray–extreme ultraviolet multilayer mirrors for the 2-to 12-nm wavelength region / C. Montcalm, P. A. Kearney, J. M. Slaughter, B. T. Sullivan, M. Chaker, H. Pépin, C. M. Falco // Applied Optics. – 1996. – V. 35. – №. 25. – P. 5134–5147.
77. Барышева, М. М. Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов / М. М. Барышева, А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182. – №. 7. – С. 727–747.
78. 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.
79. Huang, Q. High reflectance Cr/V multilayer with B_4C barrier layer for water window wavelength region / Q. Huang, J. Fei, Y. Liu et al. // Optics Letters. – 2016. – V. 41. – №. 4. – P. 701–704.
80. 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.
81. 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.
82. Schuster, M. Parallel-beam coupling into channel-cut monochromators using curved graded multilayers / M. Schuster, H. Gobel // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1995. – V. 28. – №. 4A. – P. A270.
83. Mimura, H. Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing / H. Mimura, S. Handa, T. Kimura et al. // *Nature physics*. – 2010. – V. 6. – №. 2. – P. 122–125.
84. Kortright, J. B. Multilayer optical elements for generation and analysis of circularly polarized x-rays / J. B. Kortright, J. H. Underwood // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 1990. – V. 291. – №. 1–2. – P. 272–277.
85. Andreev, S. S. Application of free-standing multilayer films as polarizers for X-ray radiation / S. S. Andreev, M. S. Bibishkin, N. I. Chkhalo, A. Ya. Lopatin, V. I. Luchin, A. E. Pestov, K. A. Prokhorov, N. N. Salaschchenko // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2005. – V. 543. – №. 1. – P. 340–345.
86. Chkhalo, N. I. Thin film multilayer filters for solar EUV telescopes / N. I. Chkhalo, M. N. Drozdov, E. B. Klunokov, S. V. Kuzin, A. Ya. Lopatin, V. I. Luchin, N. N. Salashchenko, N. N. Tsybin, S. Yu. Zuev // *Applied Optics*. – 2016. – V. 55. – №. 17. – P. 4683–4690.
87. Akhsakhalyan, A. D. Current status and development prospects for multilayer X-ray optics at the Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences / A. D. Akhsakhalyan, E. B. Klunokov, A. Ya. Lopatin et al. // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2017. – V. 11. – №. 1. – P. 1–19.
88. Fogelqvist, E. Laboratory cryo x-ray microscopy for 3D cell imaging / E. Fogelqvist, M. Kördel, V. Carannante, B. Önfelt, H. M. Hertz // *Scientific reports*. – 2017. – V. 7. – №. 1. – P. 1–8.
89. Polkovnikov, V. N. Multilayer Cr/Sc mirrors with improved reflection for the «water transparency window» range / V. N. Polkovnikov, S. A. Garakhin, D. S. Kvashennikov, I. V. Malyshev, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, R. M.

- Smertin, N. I. Chkhalo // *Technical Physics*. – 2020. – V. 65. – №. 11. – P. 1809–1813.
90. Kuznetsov, D. S. High-reflectance La/B-based multilayer mirror for 6. x nm wavelength / D. S. Kuznetsov, A. E. Yakshin, J. M. Sturm, R. W. E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk // *Optics letters*. – 2015. – V. 40. – №. 16. – P. 3778–3781.
91. Salashchenko, N. N. Short-period X-ray multilayers based on CrSc / N. N. Salashchenko, E. A. Shamov // *Optics communications*. – 1997. – V. 134. – №. 1–6. – P. 7–10.
92. 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.
93. Morawe, C. Coherence preservation of synchrotron beams by multilayers / Ch. Morawe, R. Barrett, K. Friedrich, R. Klünder, A. Vivo // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2013. – V. 425. – №. 5. – P. 052027.
94. 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.
95. Utsumi, Y. Spatial period division with synchrotron radiation bandwidth control by W/Be multilayer mirror / Y. Utsumi, H. Kyuragi, T. Urisu // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*. – 1990. – V. 8. – №. 3. – P. 436–438.
96. Takahashi, J. Soft x-ray W/Be multilayer and its application to a diffraction grating Yuichi, Utsumi / J. Takahashi, T. Urisu, H. Maezawa // *Review of Scientific Instruments*. – 1989. – V. 60. – №. 7. – P. 2024–2026.
97. Renner O. Properties of laser-sputtered Ti/Be multilayers / O. Renner, M. Kopecký, E. Krouský, F. Schäfers, B. R. Müller, N. I. Chkhalo // *Review of scientific instruments*. – 1992. – V. 63. – №. 1. – P. 1478–1481.
98. 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.
99. 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.
100. 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. Салашенко, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало, М. В. Свечников // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 4. – С. 385–392.
101. 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.
102. Svechnikov, M. Multifitting: software for the reflectometric reconstruction of multilayer nanofilms / M. Svechnikov // Journal of Applied Crystallography. – 2020. – V. 53. – №. 1. – P. 244–252.
103. Chkhalo, N. I. Improving the optical and mechanical characteristics of aluminum thin-film filters by adding thin cap layers / N. I. Chkhalo, S. V. Kuzin, A. Ya. Lopatin, V. I. Luchin, N. N. Salashchenko, S. Yu. Zuev, N. N. Tsybin // Thin Solid Films. – 2018. – V. 653. – P. 359–364.
104. Svechnikov, M. Extended model for the reconstruction of periodic multilayers from extreme ultraviolet and X-ray reflectivity data / M. Svechnikov, D. Pariev, A. Nechay, N. Salashchenko, N. Chkhalo, Y. Vainer, D. Gaman // Journal of Applied Crystallography. – 2017. – V. 50. – №. 5. – P. 1428–1440.
105. Ming, Z. H. Microscopic structure of interfaces in Si_{1-x}Ge_x/Si heterostructures and superlattices studied by x-ray scattering and fluorescence yield / Z. H. Ming, A. Krol, Y. L. Soo, Y. H. Kao, J. S. Park, K. L. Wang // Physical Review B. – 1993. – V. 47. – №. 24. – P. 16373.

106. Medvedev, R. V. Low-energy ion polishing of Si in W/Si soft X-ray multilayer structures / R. V. Medvedev, K. V. Nikolaev, A. A. Zameshin, D. IJpes, I. A. Makhotkin, S. N. Yakunin, A. E. Yakshin, F. Bijkerk // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – V. 126. – №. 4. – P. 045302.
107. Siffalovic, P. Characterization of Mo/Si soft X-ray multilayer mirrors by grazing-incidence small-angle X-ray scattering / P. Siffalovic, E. Majkova, L. Chitu et al. // *Vacuum*. – 2009. – V. 84. – №. 1. – P. 19–25.
108. Haase, A. Multiparameter characterization of subnanometre Cr/Sc multilayers based on complementary measurements / A. Haase, S. Bajt, P. Hönicke, V. Soltwisch, F. Scholze // *Journal of applied crystallography*. – 2016. – V. 49. – №. 6. – P. 2161–2171.
109. Holý, V. Nonspecular x-ray reflection from rough multilayers / V. Holý, T. Baumbach // *Physical Review B*. – 1994. – V. 49. – №. 15. – P. 10668.
110. Stearns, D. G. Nonspecular x-ray scattering in a multilayer-coated imaging system / D. G. Stearns, D. P. Gaines, D. W. Sweeney, E. M. Gullikson // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – V. 84. – №. 2. – P. 1003–1028.
111. Herring, C. Effect of change of scale on sintering phenomena / C. Herring // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – V. 21. – №. 4. – P. 301–303.
112. Бушуев, В. А. Статистическая теория формирования межслойных шероховатостей и диффузного рассеяния рентгеновских лучей/ В. А. Бушуев, В. В. Козак // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 1999. – №. 2. – С. 96–100.
113. Kozhevnikov, I. V. Development of a self-consistent free-form approach for studying the three-dimensional morphology of a thin film / I. V. Kozhevnikov, L. Peverini, E. Ziegler // *Physical Review B*. – 2012. – V. 85. – №. 12. – P. 125439.
114. Bajt, S. Investigation of the amorphous-to-crystalline transition in Mo/Si multilayers / S. Bajt, D. G. Stearns, P. A. Kearney // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – V. 90. – №. 2. – P. 1017–1025.
115. Kozhevnikov, I. V. Use of DWBA and perturbation theory in X-ray control of the surface roughness / I. V. Kozhevnikov, M. V. Pyatakhin // *Journal of X-ray science and technology*. – 1998. – V. 8. – №. 4. – P. 253–275.

Список публикаций автора

Публикации в журналах

A1. Polkovnikov, V. N. Stable high-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 // *Optics Letters*. – 2019. – V.44. Iss.2. – P. 263–266.

A2. Зуев, С. Ю. Многослойные зеркала Mo/Si с барьерными слоями В₄С и Ве / С. Ю. Зуев, Д. Е. Парьев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, 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. Апериодические зеркала на основе бериллиевых многослойных систем / С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, 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. Салащенко, 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. Салащенко, 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. Kasatikov, 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. Smeritin, 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. Kasatnikov, 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

T1. 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 XXI Исимпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С.397–398.

T2. 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 «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 411–412.

T3. 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 «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2018. – С. 464–465.

T4. 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 «Нанопфизика 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 «Нанофизика и нанoeлектроника», 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. Ключенков, А. Я. Лопатин, В. И. Лучин, Д. Е. Парьев, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало // Материалы XXII симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», 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. Салащенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Материалы конференции «Рентгеновская оптика - 2018», г. Черногoловка. – 2018. – С. 18–20.
- Т8.** 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.
- Т9.** Гарахин, С. А. Эффективность генерации характеристического излучения Вe-содержащих мишеней / С. А. Гарахин, А. Я. Лопатин, М. С. Михайленко, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, Н. И. Чхало, Н. Н. Салащенко, Г. Д. Демин, Н. А. Дюжев, М. А. Махиборода // Материалы XXIII симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2019. – С.445–446.
- Т10.** 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. Салащенко, Н. И. Чхало // Материалы XXIII симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 477–478.
- Т11.** Лопатин, А. Я. Характеристики рентгеновских трубок с автоэмиссионным кремниевым катодом и пленочным анодом «прострельного» типа / А. Я. Лопатин, В. И. Лучин, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, Н. Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н. И. Чхало,

Н. А. Дюжев, Г. Д. Демин, М. А. Махиборода // Материалы XXIII симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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. Салащенко, М. В. Свечников, М. G. Sertsu, A. Sokolov, Н. И. Чхало, F. Schafers // Материалы XXIII симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород. – 2019. – С. 505–506.

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

T14. Гайсин, А. У. Адаптация подхода восстановления толщин слоев на основе РФЭС к изучению протяженности и строения межслойных 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 «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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 «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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 «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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 «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, Н. Н. Салащенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Н. И. Чхало // Материалы XXV симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», 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 нанoeлектроника», 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. Салащенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало, А. Д. Ахсахалян, В. А. Чернов, В. В. Кривенцов // Материалы XXV симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», 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. Салащенко, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Материалы XXV симпозиума «Наноп физика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.385–386.

- T24.** Каратаев, А. В. Влияние отжига на формирование межфазовой границы в многослойной структуре Mo/Be / 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 «Нанозфизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.411–412.
- T25.** Малышев, И. В. Высокоапертурный 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 «Нанозфизика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород. – 2021. – С.421–422.
- T26.** Плешков, Р. С. Разработка, синтез и изучение свойств Be-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 «Нанозфизика и нанозлектроника», 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. Черногловка. – 2021. – С.289–290.
- T28.** Плешков, Р. С. Синтез и изучение свойств многослойных зеркал Sr/Be 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. Черногловка. – 2021. – С.296–298.
- T29.** 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. Салашенко,

Р. М. Смертин, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало // Материалы XXVI симпозиума «Нанофизика 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 «Нанофизика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С.562–563.

Т31. Плешков, Р. С. Исследование микроструктуры границ раздела в многослойных зеркалах Cr/Be и W/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 «Нанофизика и нанoeлектроника», г. Нижний Новгород. – 2022. – С. 582–583.

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