

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального
государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук»

На правах рукописи

Шапошников Роман Анатольевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МЕЖСЛОЕВЫМИ
ГРАНИЦАМИ В МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛАХ
НА ОСНОВЕ С, В, Y, Sr**

Научная специальность: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной
физики

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Полковников Владимир Николаевич.

Нижний Новгород

2026 г.

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Методы изготовления и метрология.....	20
1.1 Принципы работы и расчет рентгенооптических характеристик многослойных рентгеновских зеркал.....	20
1.2 Установка для синтеза МРЗ.....	32
1.3 Аппаратура и методы исследования МРЗ.....	41
1.4 Выводы и основные результаты по главе 1.....	49
Глава 2. Многослойные зеркала для спектрального диапазона 4,4-9 нм.....	50
2.1 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 4,4-6,6 нм.....	50
2.2 Синтез и изучение свойств МРЗ Cr/C.....	55
2.3 Методики интерфейс-инжиниринга межслоевых границ Cr/C зеркал....	60
2.4 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 6,6-9 нм.....	66
2.5 Синтез и изучение свойств МРЗ Ru/V ₄ C.....	74
2.6 Синтез и изучение свойств МРЗ Ru/V.....	83
2.7 Основные результаты главы 2.....	87
Глава 3. Многослойные зеркала для спектрального диапазона 9-12 нм.....	88
3.1 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 9-12 нм.....	88
3.2 Свойства МРЗ на основе иттрия.....	94
3.3 Свойства МРЗ на основе стронция.....	103
3.4 Основные результаты главы 3.....	110
Глава 4. Короткопериодные многослойные зеркала Mo/V ₄ C.....	111
4.1 Короткопериодные многослойные зеркала для диапазона жесткого рентгеновского излучения.....	111
4.2 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ Mo/V ₄ C для монохроматизации излучения с энергиями 8-14 кэВ.....	117
4.3 Исследование термической стабильности и внутренних напряжений МРЗ Mo/V ₄ C.....	124
4.4 Основные результаты главы 4.....	129
Заключение.....	130
Литература.....	133
Список публикаций автора.....	142

Введение

Актуальность темы исследования

Рентгеновское излучение соответствует диапазону длин $10^{-1} < \lambda < 10$ нм. Этот диапазон разделяется на два, которые принято называть мягким рентгеновским излучением ($1 < \lambda < 10$ нм) и жестким рентгеновским излучением ($10^{-1} < \lambda < 1$ нм). В силу того, что частота рентгеновского излучения много больше собственной частоты электрона в атоме, то его взаимодействие с веществом можно рассматривать как взаимодействие с набором свободных электронов. Следовательно, в данном случае диэлектрическая проницаемость, которая фактически определяет отклик излучения при взаимодействии со средой, является функцией электронной плотности. В рентгеновском диапазоне длин волн диэлектрическая проницаемость имеет значения меньше единицы и слабо отличается от нее. Таким образом, удобно представить диэлектрическую проницаемость в виде:

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

где δ и γ – вещественные величины, определяющие рассеяние и поглощение излучения. В силу того, что $\delta \ll 1$, коэффициент отражения рентгеновского излучения от одной границы очень мал, что приводит к необходимости использования периодических структур с большим числом слоев, которые за счет конструктивной интерференции волн могут обеспечить высокие значения коэффициента отражения. Такие структуры называются многослойными рентгеновскими зеркалами. Угол, при котором достигается максимум коэффициента отражения при заданной длине волны λ для структуры с периодом d , приближенно определяется из выражения, аналогичного условию Брэгга-Вульфа:

$$2 \cdot n \cdot d \cdot \sin(\vartheta_m) = m \cdot \lambda, \quad (2)$$

где n – средний показатель преломления в структуре, d – период структуры, ϑ_m – угол m -того максимума отражения, m – номер максимума отражения, λ – длина волны падающего излучения. При этом зависимость коэффициента отражения от длины волны в окрестности максимума имеет вид колокола, полуширина которого называется спектральной шириной.

При этом период структуры может изменяться в достаточно широких пределах от единиц до сотен ангстрем. Современные технологии синтеза МРЗ позволяют получать структуры с требуемым средним по структуре значением периода с субангстремной точностью. Этот факт выгодно отличает МРЗ от кристаллов, в которых отсутствует возможность плавного изменения периода. Для конкретных практических приложений, в которых задана длина волны излучения, имеется большая свобода в проектировании оптической схемы, определяющей угол падения излучения, который может варьироваться в широких пределах в случае использования многослойных зеркал.

Основными характеристиками многослойных рентгеновских зеркал, имеющими значение для конкретных приложений, являются коэффициент отражения на рабочей длине волны и спектральная селективность, определяющаяся по спектральной кривой отражения как отношение спектральной ширины брэгговского пика на половине высоты $\Delta\lambda$ к рабочей длине волны λ : $\Delta\lambda/\lambda$. В зависимости от того, какой из указанных выше параметров является приоритетным, осуществляется выбор материалов структуры.

Выбор материалов зависит от спектрального диапазона, на который структуры должны быть оптимизированы. Это обуславливается тем фактом, что отражение, прохождение и поглощение электромагнитного излучения в среде сильно зависит от длины волны в силу дисперсии оптических констант. Базовое правило выбора материалов звучит следующим образом. В рабочем диапазоне длин волн выбирается материал, обладающий наименьшим поглощением. В пару к нему выбирается материал, обеспечивающий, с одной стороны, высокий оптический контраст с первым материалом, а, с другой стороны, обладающий, по возможности, малым поглощением.

Многослойные рентгеновские зеркала находят свое применение в различных областях науки и техники. В качестве одного из важных практических приложений можно выделить применение многослойных зеркал для астрономии. В данной области большой интерес для исследований представляет собой анализ спектров излучения солнечной короны, на основании которых можно сделать выводы о протекающих в ней процессах. При этом из всего спектрального диапазона, в

котором излучает Солнце, требуется выделить конкретную длину волны, соответствующую излучению ионов, находящихся в определенной части короны Солнца. Таким образом, возникает задача разработки МРЗ с высокой спектральной селективностью. Другим требованием к зеркалам для солнечной астрономии является наличие у них высоких значений коэффициента отражения, так как это позволяет снизить время накопления сигнала на детекторе излучения, что важно при изучении динамических процессов в короне Солнца. В диапазоне длин волн 11 – 30 нм хорошо зарекомендовали себя структуры на основе кремния [1, 2], бериллия и алюминия [3, 4], обладающие коэффициентами отражения до 70%, что позволяет проводить исследование излучения ионов, соответствующих нижним и средним слоям солнечной короны. При этом стоит отметить, что одной из ярких линий, присутствующих в солнечном спектре, является линия излучения ионов Fe XVIII (9,4 нм) [5], которые формируются в верхних слоях короны Солнца. Однако отсутствие многослойных зеркал, способных обеспечить высокие значения коэффициента отражения на данной длине волны, затрудняет изучение процессов, протекающих в верхних слоях солнечной короны.

Другим важным практическим приложением многослойных зеркал является проекционная рентгеновская литография, которая представляет собой метод создания изображения путем засветки фоторезиста излучением с определенной длиной волны. На данный момент – это наиболее перспективный метод литографии при производстве сверхбольших интегральных схем, а, следовательно, его развитие представляет собой актуальную задачу. В соответствии с критерием Рэля минимальный разрешаемый размер объекта равен:

$$a_{min} = \frac{k \cdot \lambda}{NA}, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности (порядка единицы), NA – числовая апертура объектива, λ – длина волны излучения. На данный момент хорошо развита технология литографии с длиной волны 13,5 нм, что во многом обуславливается наличием рентгеновских зеркал, обеспечивающих высокие значения коэффициента отражения. Однако для увеличения плотности элементов на микросхеме необходимо увеличивать разрешение оптической системы, что может быть осуществлено путем перехода к использованию излучения с меньшей длиной волны. Хорошо изученные

на данный момент многослойные Mo/Si зеркала имеют низкий коэффициент отражения при $\lambda < 12,4$ нм (L-край поглощения Si) из-за высокого поглощения в слоях Si. Оптические элементы на основе бериллия неэффективны при $\lambda < 11,2$ нм (K-край поглощения Be). Это приводит к необходимости поиска альтернативных материалов для синтеза на их основе многослойных рентгеновских зеркал для литографии с длиной волны, короче 13,5 нм.

На данный момент активно обсуждается переход к литографии на длине волны 11,2 нм [6], на которой были достигнуты рекордные, до 72%, коэффициенты отражения [7, 8] и конверсия энергии лазерного излучения около 4% [9, 10]. Однако максимум излучения эмиссионной полосы Xe находится на длине волны 10,8 нм, на которой Ru/Be многослойные зеркала имеют низкие коэффициенты отражения [11, 12]. Другая перспективная длина волны для литографии – 6,7 нм, которая соответствует излучению твердотельных мишеней тербия и гадолиния, и на которой борсодержащие многослойные зеркала, теоретически, обладают высокими коэффициентами отражения [13, 14]. Однако продвижение технологии проекционной литографии в этот диапазон сдерживается отсутствием достаточных (более 65%) коэффициентов отражения многослойных зеркал, а использование структур с низкими коэффициентами отражения приведет к существенному увеличению времени засветки фоторезиста, что, в свою очередь, снизит скорость производства микросхем, делая такую технологию коммерчески невыгодной.

Еще одним актуальным практическим применением многослойных рентгеновских зеркал является рентгеновская микроскопия, направленная на исследование биологических образцов [15]. Перспективным для данной задачи спектральным диапазоном является область 4,4 – 6,6 нм. Данный диапазон зачастую называют «углеродным окном» или «окном прозрачности углерода», так как лежит за K-краем поглощения углерода ($\lambda = 4,4$ нм), и в указанной спектральной области углерод обладает слабым поглощением. Достоинства этого диапазона для гистологических исследований обсуждаются в [16]. Однако развитие рентгеновской микроскопии сдерживается невысокими коэффициентами отражения существующих для данного спектрального диапазона зеркал, на основе которых

могла бы быть спроектирована оптическая схема микроскопа, оптимизированного на работу в «углеродном окне».

Таким образом, актуальной является задача разработки и создания высокоотражающих многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на диапазон длин волн 4,4 – 12 нм. Анализ оптических констант показывает, что в диапазоне длин волн 4,4 – 12 нм наиболее перспективными материалами для создания на их основе структур с высокими коэффициентами отражения являются иттрий, стронций, лантан, бор, углерод. Однако работа с большинством из данных материалов существенно затруднена в силу их высокой химической активности, которая приводит к деградации отражательных характеристик. Здесь можно выделить 2 ключевых фактора, препятствующих созданию высокоотражающих многослойных зеркал. Во-первых, в процессе синтеза многослойных рентгеновских зеркал происходит химическое взаимодействие материалов на границах, а также диффузия атомов одного материала в слои другого, что приводит к формированию переходной области между слоями, рост которой, в свою очередь, снижает коэффициент отражения как от каждой границы раздела, так и от структуры в целом. Этот факт приводит к тому, что экспериментально полученные значения коэффициента отражения существенно отличаются от теоретических. Во-вторых, при взаимодействии уже синтезированной структуры с атмосферой происходит окисление слоев химически активных материалов, которое приводит к дополнительному поглощению в структуре и, соответственно, к деградации отражательных характеристик с течением времени. Следовательно, возникает задача по развитию методик управления межслоевыми границами, которые бы позволили повысить получаемые на практике значения коэффициента отражения, а также улучшить временную стабильность рентгенооптических характеристик зеркал.

Важным практическим применением многослойных рентгеновских зеркал, помимо солнечной астрономии, проекционной литографии и рентгеновской микроскопии, являются системы монохроматизации на станциях синхротронного излучения [17-22]. Одним из аспектов, который необходимо учитывать при разработке отражательных элементов для данных монохроматоров, является возможность перехвата зеркалом как можно большей части пучка синхротронного

излучения. Для решения данной задачи необходимо увеличивать размер зеркала или же диапазон рабочих углов, что, в соответствии с условием (1), приводит к необходимости уменьшения периода МРЗ.

Другой аспект использования многослойных зеркал в монохроматорах связан с их спектральной селективностью. В ряде рентгеноструктурных задач достаточны пучки с уровнем монохроматизации 0,3-1% [23]. В этом случае использование МРЗ на 2 порядка повышает интенсивность зондового пучка по сравнению с монокристаллами.

Третий аспект связан с увеличением энергии фотонов, доступных на синхротронах 4-го поколения. Для сохранения эффективности сбора излучения из источника укорочение длины волны автоматически требует уменьшения периодов МРЗ. Все это делает актуальным поиск новых и дополнительные исследования уже известных типов многослойных зеркал с короткими (меньше 2 нм) и ультракороткими (меньше 1 нм) периодами. Наиболее универсальными и распространенными короткопериодными МРЗ являются зеркала на основе пары материалов W/W₄C. Однако недостатком этих зеркал является уменьшение коэффициента отражения при энергиях падающего излучения больше 10 кэВ в силу увеличения поглощения вольфрама, а также резкий рост межслоевой шероховатости при периодах менее 1,3 нм [24]. Следовательно, возникает задача поиска альтернативных пар материалов для синтеза короткопериодных структур. Теоретический расчет показывает, что перспективной парой материалов для данной задачи является Mo/W₄C. Стоит отметить, что влияние переходных областей в многослойных рентгеновских зеркалах оказывает особенно большое влияние на отражательные характеристики структур с малым значением периода. Таким образом задача изучения межслоевых границ является актуальной для Mo/W₄C зеркал.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на большую практическую значимость приложений в диапазоне длин волн 4,4 – 12 нм, известные на данный момент экспериментально измеренные коэффициенты отражения либо сильно уступают их теоретическим пределам

(зеркала на основе Y для диапазона 9 – 12 нм, зеркала на основе La для окрестности длины волны 6,7 нм, зеркала на основе C для диапазона 4,4 – 6 нм), либо обладают крайне низкой временной стабильностью (коэффициент отражения зеркал на основе Sr деградирует до величины меньше 1% в течение суток). Таким образом, на данный момент в литературе нет данных о зеркалах на основе стронция, обладающих высокой временной стабильностью, что объясняется сложностью работы с данным материалом. В то же время, теоретический анализ показывает, что с точки зрения оптических характеристик иттрий и стронций являются лучшими материалами для синтеза на их основе многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на рабочий спектральный диапазон 9 – 12 нм, что оставляет задачу по их разработке и созданию крайне актуальной.

В ряде работ обсуждался синтез многослойных структур на основе Cr/C, оптимизированных на рабочий диапазон 4,4 – 6,6 нм. Однако данные исследования не являются достаточно полными. Во-первых, в литературе не было найдено систематического исследования структурных параметров и отражательных характеристик Cr/C зеркал с разными периодами. Во-вторых, теоретический коэффициент отражения Cr/C структур нормального падения, которые представляют собой наибольший интерес для микроскопических приложений, существенно выше известного на данный момент экспериментально полученного коэффициента отражения. Стоит отметить, что максимальный экспериментальный результат был получен без использования каких-либо методик улучшения границ раздела (интерфейс-инжиниринга), что оставляет открытым актуальный вопрос о возможности получения больших значений коэффициента отражения на практике за счет улучшения качества межслоевых границ.

Проведенные на сегодняшний день исследования зеркал на основе La в окрестности длины волны 6,7 нм показали существенное отличие коэффициентов отражения от теоретического предела, даже с применением методики интерфейс-инжиниринга. Более того, в литературе отсутствуют данные об отражательных характеристиках зеркал на основе пар материалов Ru/B и Ru/B₄C в спектральном диапазоне 6,6 – 9 нм. При этом теоретический расчет показывает, что данные структуры обладают более высокими коэффициентами отражения, чем структуры на

основе La, при рабочих длинах волн, больше 7,5 нм. Также, несмотря на лучшие оптические характеристики La/V структур, экспериментально полученные коэффициенты отражения в окрестности длины волны 6,7 нм могут быть на одном уровне у зеркал на основе Ru/V и La/V за счет меньшей величины переходных областей. Следовательно, изучение отражательных характеристик и структурных параметров Ru/V и Ru/V₄C зеркал является актуальной задачей.

Несмотря на активно развитую методологию синтеза W/V₄C структур для синхротронных приложений остается актуальной задача по поиску альтернативных пар материалов, для синтеза на их основе многослойных рентгеновских зеркал, обеспечивающих, как высокую степень монохроматизации, так и высокие значения коэффициента отражения. Перспективной структурой может рассматриваться Mo/V₄C, однако данные зеркала не были исследованы в области жесткого рентгеновского диапазона. Также остается важной задачей является подробное изучение их структурных параметров при уменьшении периода. Следовательно, синтез и исследование многослойных зеркал на основе пары материалов Mo/V₄C является актуальной задачей для синхротронных приложений.

Цель диссертационной работы

Целью работы является изучение структурных параметров и отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе C, B, Y, Sr, а также развитие методов управления межслоевыми границами для повышения коэффициентов отражения, спектральной селективности и временной стабильности зеркал.

Задачи диссертационной работы

- 1) Исследование структурных параметров и отражательных характеристик Sr/C зеркал, оптимизированных на рабочий диапазон длин волн 4,4 – 6,6 нм. Исследование влияния пассивации слоев и распыления в смеси газов на свойства зеркал.

- 2) Исследование структурных параметров и отражательных характеристик Ru/B₄C и Ru/B зеркал, оптимизированных на рабочий диапазон длин волн 6,6 – 9 нм. Исследование влияния прослоек углерода на свойства зеркал.
- 3) Исследование структурных параметров и отражательных характеристик Ru/Y и Ru/Sr многослойных зеркал, оптимизированных на рабочий диапазон длин волн 9 – 12 нм. Исследование влияния прослоек карбида бора на отражательные свойства и временную стабильность зеркал.
- 4) Исследование структурных параметров и отражательных характеристик короткопериодных Mo/B₄C зеркал.

Научная новизна работы

- 1) Впервые проведено систематическое изучение структурных параметров и отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C. Впервые применены методики интерфейсинжиниринга, которые позволили улучшить качество межслоевых границ и получить рекордные значения коэффициента отражения для Cr/C зеркал нормального падения, оптимизированных на работу в окрестности длины волны 4,4 нм.
- 2) Впервые изучены отражательные характеристики многослойных рентгеновских зеркал на основе пар материалов Ru/B₄C и Ru/B в области мягкого рентгеновского диапазона длин волн. Исследование структурных параметров данных МРЗ показало, что зеркала обладают малыми значениями величины переходных областей для любой доли рутения в периоде, а также для разных значений периода, что позволяет получить значения коэффициента отражения близкие к теоретическому пределу. Этот факт показывает перспективность их использования в спектральном диапазоне 6,6 – 9 нм. Показано, что Ru/B₄C и Ru/B зеркала могут являться альтернативой зеркалам на основе лантана.
- 3) Впервые разработаны и синтезированы многослойные зеркала на основе пары материалов Ru/Sr, обладающие рекордными значениями коэффициента отражения на длине волны 9,34 нм. Показано, что синтезированные зеркала

сохраняют отражательные характеристики при взаимодействии с атмосферой в течение длительного, как минимум, до двух месяцев, времени и могут использоваться в научных и технических приложениях.

- 4) Впервые показано, что применение B_4C барьерных слоев в процессе синтеза Ru/Y многослойных зеркал приводит к существенному уменьшению переходных межслоевых областей, что, в свою очередь, позволило получить значения коэффициентов отражения близкие, к рекордным значениям для Pd/Y зеркал на длине волны 9,34 нм. При этом Ru/Y зеркала с барьерными слоями карбида бора имеют лучшую спектральную селективность (1,7%), чем Pd/Y зеркала (2,1%), что делает их использование выгодным в задачах солнечной астрономии и спектроскопии.
- 5) Впервые изготовлены многослойные зеркала на основе пары материалов Mo/B_4C с ультракороткими периодами (до 0,8 нм) и изучены их структурные параметры и отражательные характеристики. Установлено, что Mo/B_4C зеркала имеют спектральную селективность лучше 1% при периодах меньше 1,2 нм.

Научная и практическая значимость работы

- 1) Разработка и синтез с помощью методик интерфейс-инжиниринга зеркал на основе пары материалов Cr/C , обладающих рекордными значениями коэффициента отражения, открывает широкие перспективы по их использованию в качестве отражательных элементов в оптических схемах микроскопов, оптимизированных на работу в области «окна прозрачности углерода», что способствует активному развитию рентгеновской микроскопии.
- 2) Изучение структурных параметров зеркал на основе пары материалов Ru/B_4C и Ru/B показало, что они могут являться альтернативой зеркалам на основе La в спектральном диапазоне 6,7 – 9 нм для приложений литографии, спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа.
- 3) Разработка и синтез высокоотражающих зеркал Ru/Y и Ru/Sr , оптимизированных на диапазон 9 – 12 нм, открывают широкие

перспективы для использования излучения с длиной волны из указанной спектральной области в технологии проекционной литографии. Также становится возможным создание оптических схем на основе данных зеркал для их использования в астрономических приложениях.

- 4) Результаты исследования Mo/W₄C зеркал показывают, что данные структуры с ультракороткими периодами могут являться альтернативой использовавшимся ранее зеркалам W/W₄C в системах монохроматизации синхротронного излучения.

Методология и методы исследований

Многослойные рентгеновские зеркала на основе пар материалов Ru/Y, Ru/Sr, Ru/W₄C, Mo/W₄C были синтезированы методом магнетронного напыления. Слои бора в Ru/W структурах наносились методом ионно-пучкового распыления. Все слои материалов осаждались на кремниевые подложки.

Измерение коэффициентов отражения исследуемых структур проводилось как в области жесткого, так и мягкого рентгеновского излучения. Для анализа отражательных характеристик измерялись как спектральные зависимости коэффициента отражения при заданном угле падения излучения, так и угловые зависимости при фиксированной длине волны. Результаты лабораторных измерений показали хорошее соответствие с синхротронными измерениями, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Восстановление структурных параметров синтезированных зеркал осуществлялось с помощью разработанного в ИФМ РАН программного обеспечения Multifitting, также позволяющего проводить расчет кривых отражения на длинах волн, отличных от тех, на которых измерялись образцы, с учетом восстановленных структурных параметров.

Исследование термической стабильности образцов осуществлялось путем измерения зависимостей коэффициента отражения до и после их отжига в вакуумной камере.

Исследование внутренних напряжений проводилось интерферометрическим методом с помощью интерферометра ZYGO VERIFIRE путем измерения профиля поверхности подложки до и после нанесения на нее многослойной структуры.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Пассивация азотом поверхности слоев углерода в многослойных зеркалах Cr/C приводит к уменьшению величины переходной области на границе Cr-на-C с $\sim 0,5$ нм до $\sim 0,4$ нм, в результате чего для зеркал нормального падения данного типа достигается рекордное значение коэффициента отражения $R = 20,2\%$ на длине волны $\lambda = 4,47$ нм.
- 2) В многослойных зеркалах Ru/B₄C с периодами 3,5 – 5 нм значения ширины переходных областей не зависят от доли рутения в периоде и остаются на уровне 0,2 нм, что позволяет получать близкие к предельным значениям коэффициенты отражения на длине волны 9,34 нм.
- 3) В многослойных зеркалах Ru/B с периодами $\sim 3,5$ нм граница B-на-Ru является более протяженной ($\sim 0,7$ нм), чем граница Ru-на-B ($\sim 0,2$ нм). Нанесение слоев углерода с толщиной $\sim 0,3$ нм на протяженную границу позволяет уменьшить величину переходной области в два раза. Это позволяет получить расчетный коэффициент отражения для зеркал нормального падения Ru/C/B $R = 68,9\%$ на длине волны 6,65 нм, что превосходит рекордные значения для данной длины волны.
- 4) В многослойных зеркалах Ru/Y с периодами ~ 5 нм граница Ru-на-Y является более протяженной (1,3 нм), чем граница Y-на-Ru (0,2 нм). Значения коэффициента отражения зеркал нормального падения Ru/Y составляют $R = 29\%$ на длине волны 9,34 нм. Нанесение слоев B₄C толщиной 0,4 нм на более протяженную границу приводит к уменьшению величины переходной области до 0,6 нм, что, в свою очередь, позволяет получить значение коэффициента отражения $R = 38,5\%$ на длине волны 9,34 нм.
- 5) Добавление в структуру Ru/Sr барьерных слоев B₄C на поверхность слоев стронция предотвращает деградацию отражательных характеристик со

временем. Коэффициенты отражения многослойных зеркал Sr/B₄C/Ru достигают значений: R = 62,3% на длине волны 11,4 нм и R = 48,6% на длине волны 9,34 нм.

- б) В многослойных зеркалах Mo/B₄C по мере уменьшения периода от 3,4 до 0,8 нм наблюдается рост величин переходных областей на значения ~0,1 нм. При этом многослойные зеркала с ультракороткими периодами 0,8 нм могут быть использованы в качестве отражательных элементов. Mo/B₄C зеркала имеют спектральную селективность лучше 1% при периодах меньше 1,2 нм.

Публикации по теме

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 44 работы: 18 - статьи в реферируемых научных журналах [A1-A18] и 26 - в сборниках конференций и школ [T1-T26]. Результаты научных исследований были представлены на 4 научных конференциях и 4 школах молодых ученых. По результатам работы зарегистрирован 1 патент.

Личный вклад автора

Автор внес определяющий вклад в работы, результаты которых вошли в диссертационную работу. В частности, для синтеза всех экспериментальных образцов автором диссертации самостоятельно была осуществлена модернизация технологической установки магнетронного напыления и найдены оптимальные параметры технологического процесса. Предварительный теоретический анализ отражательных характеристик и оптимальный дизайн образцов многослойных рентгеновских зеркал, синтез всех экспериментальных образцов, проведение измерений угловых зависимостей коэффициента отражения в области жесткого рентгеновского диапазона длин волн, обработка экспериментальных данных с целью определения структурных параметров зеркал были проведены автором самостоятельно. Интерферометрическая методика измерений механических напряжений в пленках, проведение измерений и обработка экспериментальных данных автором были выполнены самостоятельно. В большинстве случаев статьи в

научные журналы и доклады на конференциях, сделанные по результатам диссертационной работы, приготавливались автором самостоятельно. Автор совместно с руководителем осуществлял планирование эксперимента и обсуждение полученных результатов.

Апробация результатов

Все полученные результаты были опубликованы в рецензируемых журналах. Результаты работ по синтезу и исследованию отражательных характеристик Ru/Y и Ru/Sr многослойных рентгеновских зеркал докладывались на XXVI международном симпозиуме «Нанопизика и нанопэлектроника», проходившем в г. Нижний Новгород в 2022 году. Результаты работ по синтезу и исследованию отражательных характеристик и структурных параметров Mo/V₄C многослойных рентгеновских зеркал были представлены на XXVII международном симпозиуме «Нанопизика и нанопэлектроника», проходившем в г. Нижний Новгород в 2023 году. Результаты работ по синтезу и исследованию отражательных характеристик и структурных параметров Ru/V₄C были представлены на XXVIII международном симпозиуме «Нанопизика и нанопэлектроника», проходившем в г. Нижний Новгород в 2024 году. Результаты работ по синтезу и исследованию отражательных характеристик и структурных параметров Cr/C были представлены на XXIX международном симпозиуме «Нанопизика и нанопэлектроника», проходившем в г. Нижний Новгород в 2025 году.

Результаты лабораторных измерений кривых зеркального отражения и диффузного рассеяния Mo/V₄C на длине волны 0.154 нм показали хорошее соответствие с измерениями, проведенными на Курчатовском источнике синхротронного излучения ("КИСИ-Курчатов"). Результаты лабораторных измерений кривых зеркального отражения на длинах волн 11,4 нм и 9,34 нм Ru/Y и Ru/Sr зеркал показали хорошее соответствие с измерениями, проведенными на синхротроне BESSY-II.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и списка литературы. Объем диссертации составляет 150 стр., приведено 66 рисунков и 10 таблиц.

Содержание работы по главам

Во введении дается общее описание многослойных рентгеновских зеркал, а также обзор их применения в таких практических приложениях, как солнечная астрономия, проекционная рентгеновская литография, системы монохроматизации рентгеновского излучения, рентгеновская микроскопия. Формулируются проблемы, являющиеся факторами, сдерживающими реализацию в полном объеме потенциала многослойных рентгеновских зеркал в указанных областях науки и техники. Также во введении формулируется актуальность решаемой автором задачи, описываются цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, публикации по теме диссертации, личное участие автора, апробация результатов, структура и объем диссертации.

В первой главе приводится описание основных физических принципов работы многослойных зеркал, особенностей взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, основных методик, позволяющих сформулировать принципы выбора материалов и провести расчет отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал, а также факторов, влияющих на отличие расчетных характеристик от экспериментальных. Также в первой главе приводится описание аппаратуры для синтеза многослойных рентгеновских зеркал, описание экспериментальной установки, на которой проводился синтез структур, описание оборудования, использовавшегося для измерения отражательных характеристик синтезированных структур, и описание методов исследования структурных параметров МРЗ по данным рентгеновского отражения.

Во второй главе проводится литературный обзор по многослойным структурам, оптимизированным на диапазоны 4,4 – 9 нм. Также приводятся результаты исследований отражательных характеристик и структурных параметров многослойных зеркал на основе пар материалов Cr/C, оптимизированных на

спектральный диапазон 4,4 – 6,6 нм, а также Ru/V и Ru/V₄C, оптимизированных на спектральный диапазон 6,6 – 9 нм. Показано, что граница Cr-на-C является более протяженной, чем C-на-Cr для Cr/C структур с периодами в диапазоне от $d = 2,28$ нм до $d = 8,7$ нм. Примененный в работе метод пассивации азотом слоев углерода позволил снизить величину переходной области на границе Cr-на-C с 0,51 нм до 0,39 нм и достичь рекордных значений коэффициента отражения на длине волны $\lambda = 4,47$ нм.

Показано, что структуры Ru/V₄C обладают низкими значениями межслоевых интерфейсов на уровне 0,2 нм, а зеркала Ru/V имеют асимметричные межслоевые области: граница V-на-Ru является более протяженной (0,69 нм), чем Ru-на-V (0,21 нм), что, в свою очередь, обусловлено в основном перемешиванием материалов. При этом применение методики нанесения барьерных слоев углерода на наиболее протяженную границу позволяет существенно снизить величину переходной области. Показано, что в данном случае коэффициент отражения может достигать рекордных значений в окрестности длины волны 6,6 нм.

В третьей главе приводится обзор литературы по многослойным структурам, оптимизированным на спектральный диапазон 9 – 12 нм. Также приводятся результаты исследований многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/Y и Ru/Sr для спектрального диапазона 9 – 12 нм. Показано, что структура Ru/Y имеет асимметричные межслоевые границы, при этом граница Ru-на-Y является более протяженной. Продемонстрировано, что нанесение барьерных слоев карбида бора на более протяженную границу позволяет существенно уменьшить ширину переходной области, а также повысить коэффициент отражения, приблизив его значение к теоретическому пределу. Результаты исследований многослойных Ru/Sr структур показали, что в отсутствие барьерных слоев наблюдается сильное снижение брэгговских пиков. При этом в области мягкого рентгеновского диапазона коэффициент отражения падает до значений порядка 1% в течение 2 недель, что, по-видимому, объясняется окислением структуры при ее взаимодействии с атмосферой. Продемонстрировано, что использование барьерных слоев карбида бора позволяет существенно улучшить отражательные характеристики и временную стабильность Ru/Sr структуры, а также получить

рекордные значения коэффициентов отражения, которые остаются стабильными в течение, как минимум, двух месяцев. Данные измерения коэффициента отражения, проведенные с помощью лабораторных приборов, показали хорошее совпадение с синхротронными измерениями, что подтверждает достоверность полученных результатов.

В четвертой главе приводится литературный обзор по короткопериодным многослойным рентгеновским зеркалам. Также приводятся результаты исследований отражательных и структурных параметров многослойных зеркал на основе пары материалов Mo/W₄C. Исследована возможность применения Mo/W₄C многослойных структур для монохроматизации излучения с энергиями фотонов 8 – 14 кэВ. Показано, что Mo/W₄C многослойные зеркала обладают хорошей температурной стабильностью: при отжиге до 300 градусов отсутствует деградация отражательных характеристик. Показано, что отжиг позволяет существенно уменьшить величину внутренних напряжений в структуре. Продемонстрирована возможность синтеза структур Mo/W₄C с ультракороткими значениями периода (до 0,8 нм). Показано, что с уменьшением периода отсутствует рост межслоевой шероховатости, а структуры продолжают работать, как многослойные зеркала, что открывает перспективы по их использованию в системах монохроматизации синхротронного излучения.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

Глава 1. Методы изготовления и метрология

1.1 Принципы работы и расчет рентгенооптических характеристик многослойных рентгеновских зеркал

При выборе материалов МРЗ необходимо учитывать зависимость их оптических характеристик от длины волны падающего излучения. В случае рентгеновского диапазона длин волн частота излучения превышает частоты движения электронов верхних оболочек в атомах вещества, что позволяет приближенно описывать процесс взаимодействия излучения с веществом, как движение свободных электронов в поле внешней волны, пренебрегая взаимодействием электронов с ядрами атомов и друг с другом [25]. Также в силу малости скорости движения электронов в атоме по сравнению со скоростью света, расстояния, проходимые электронами в течение периода волны, малы по сравнению с длиной волны, что позволяет считать внешнее поле однородным. Таким образом, уравнение движения электрона в поле волны будет иметь вид:

$$m_e \frac{dv}{dt} = e\mathbf{E} = e\mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}, \quad (1.1)$$

где m_e – масса электрона, e – заряд электрона, v – скорость, приобретаемая электроном в поле волны, \mathbf{E} – внешнее электрическое поле, \mathbf{E}_0 – амплитуда поля, ω – частота поля. Тогда в силу уравнения (1.1), v равно:

$$\mathbf{v} = \frac{ie\mathbf{E}}{m_e\omega}. \quad (1.2)$$

Плотность тока \mathbf{j} , создаваемая полем волны равна:

$$\mathbf{j} = en_e\mathbf{v} = \frac{ie^2n_e}{m_e\omega}\mathbf{E}, \quad (1.3)$$

где $n_e(\mathbf{r})$ – истинная электронная плотность в веществе. Введем этот ток в уравнения Максвелла и получим:

$$\text{rot}\mathbf{E} = i\frac{\omega}{c}\mathbf{H}, \quad (1.4)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = -\frac{i\omega}{c}\mathbf{E} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} = -\frac{i\omega}{c}\left(1 - \frac{4\pi e^2n_e}{m_e\omega^2}\right)\mathbf{E}. \quad (1.5)$$

Стоит отметить, что в данном случае величины \mathbf{E} и \mathbf{H} имеют смысл электрического и магнитного поля в вакууме, а взаимное влияние волны и среды

друг на друга учитывается через плотность тока \mathbf{j} . Для описания связи поля в среде с полем в вакууме используем уравнение:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}. \quad (1.6)$$

Тогда уравнение (1.5) будет иметь вид:

$$\text{rot} \mathbf{H} = -\frac{i\omega}{c} \mathbf{D} \quad (1.7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{m_e \omega^2}, \quad (1.8)$$

где величина $\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}$ является квадратом плазменной частоты. Если представить диэлектрическую проницаемость в виде:

$$\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma, \quad (1.9)$$

и учесть выражения для классического радиуса электрона $r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}$, длины волны $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ и выразить электронную плотность через атомные факторы рассеяния f_1 и f_2 , то выражения для величин δ и γ будут иметь вид:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 n_e}{m_e \omega^2} = 1 - r_0 \left(\frac{4\pi c^2 n_e}{\omega^2} \right) = 1 - r_0 \frac{1}{\pi} \lambda^2 n_e$$

$$\delta = \frac{r_0}{\pi} \lambda^2 N f_1, \quad (1.10)$$

$$\gamma = \frac{r_0}{\pi} \lambda^2 N f_2, \quad (1.11)$$

где N – концентрация атомов.

Данный результат имеет два важных следствия для рентгеновского диапазона длин волн. Во-первых, диэлектрическая проницаемость имеет смысл физической величины, характеризующей связь между полем волны в вакууме и в веществе, однако, в данном случае вещество рассматривается как набор свободных электронов. Таким образом, при падении электромагнитной волны на вещество ее отражение, прохождение и поглощение в структуре определяется электронной плотностью. Во-вторых, видна зависимость диэлектрической проницаемости от

длины волны падающего излучения, вследствие чего для каждого диапазона длин волн необходимо корректно выбирать материалы, из которых в дальнейшем будут синтезированы многослойные рентгеновские зеркала.

Правила выбора материалов для рабочего спектрального диапазона позволяет сформулировать метод медленных амплитуд. В рамках данного подхода поле волны находится из решения волнового уравнения, которое имеет вид [26]:

$$\frac{d^2E}{dz^2} + k^2[\varepsilon(z) - \sin^2\theta]E(z) = 0, \quad (1.12)$$

где $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число в вакууме, $\varepsilon(z)$ – диэлектрическая проницаемость, изменяющаяся периодическим образом вглубь структуры, z – координата вглубь структуры, θ – угол между волновым вектором и нормалью к поверхности, E – электрическое поле. При этом $\varepsilon(z) = 1$ при $z < 0$ и $\varepsilon(z) = \varepsilon_{\text{подложки}}$ при $z > L$, где L – толщина всей структуры.

Разложение диэлектрической проницаемости в ряд Фурье позволяет представить ее в виде:

$$\varepsilon(z) = \mu + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos\left(\frac{2\pi mz}{d}\right), \quad (1.13)$$

где d – период изменения диэлектрической проницаемости, $B_m = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sin(\pi m\beta/(\pi m))$ – модуляция структуры, $\mu = \beta\varepsilon_1 + (1 - \beta)\varepsilon_2$ – среднее по периоду значение диэлектрической проницаемости, $\beta = d_1/d$ – отношение толщины сильно-поглощающего материала в периоде (в данном случае обозначен индексом 1) к периоду структуры. Введем брэгговский резонансный член в виде $b_m = (m\lambda/2d)^2 + \sin^2\varphi - \mu$. При этом предполагается, что $|B_m| \ll 1$ и $|b_m| \ll 1$, что описывает случай слабомодулированной структуры и резонансного взаимодействия волны со структурой.

Решение волнового уравнения будет представлено в виде суперпозиции падающей и отраженных волн:

$$E(z) = E_+(z)e^{\frac{i\pi mz}{d}} + E_-(z)e^{-\frac{i\pi mz}{d}}, \quad (1.14)$$

где $m = 1, 2, \dots$, E_+ – соответствует падающей волне, E_- – отраженной. Подставляя данный вид поля в волновое уравнение, а также разложение диэлектрической

проницаемости, введем граничные условия $E_+(0) = 1$, $E_-(L) = 0$, первое из которых означает, что на структуру падает волна единичной амплитуды, а второе – что в подложке существует только прошедшая вглубь нее волна. Также предполагается, что амплитуда поля медленно меняется на периоде структуры: $\left| \frac{d^2 E_+}{dz^2} \right| \ll \left| \frac{dE_+}{dz} \right| \cdot 2\pi/d$. Коэффициенты отражения R и прохождения T выражаются через амплитуды отраженной и падающей волн следующим образом:

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

$$T = |E_+(L)|^2. \quad (1.16)$$

Тогда для s- и p-поляризованной волны выражения для коэффициента отражения и прохождения в зависимости от длины волны и угла падения излучения будут иметь вид:

$$R^{s,p}(\theta, \lambda) = \left| \frac{\left(\frac{B_m \sigma}{2}\right) th(S_m L)}{b_m th(S_m L) - i \sqrt{\left(\frac{B_m \sigma}{2}\right)^2 - b_m^2}} \right|^2, \quad (1.17)$$

$$T^{s,p}(\theta, \lambda) = \left| \frac{\sqrt{\left(\frac{B_m \sigma}{2}\right)^2 - b_m^2}}{ch(S_m L)(b_m th(S_m L) - i \sqrt{\left(\frac{B_m \sigma}{2}\right)^2 - b_m^2})} \right|^2, \quad (1.18)$$

где $S_m = \frac{\pi m}{2d \cos^2 \varphi} \sqrt{\left(\frac{B_m \sigma}{2}\right)^2 - b_m^2}$ – коэффициент затухания волны в структуре, N – число периодов в структуре, $\sigma(\varphi) = 1$ для s-поляризации и $\sigma(\varphi) = \cos(2\varphi)$ для p-поляризации. Из полученных выражений видно, что в случае выполнения брэгговского условия $\text{Im}(B_m^2 \sigma^2 / 4 - b_m^2) = 0$, коэффициент отражения достигает своего пикового (резонансного) значения, которое определяется следующей формулой:

$$R_0^{s,p} = \frac{1 - u^{s,p}}{1 + u^{s,p}}, \quad (1.19)$$

где $u^{s,p} = \frac{1 - \sigma_0^2 / y^2}{1 + f^2 \sigma_0^2 / y^2}$, $y = \frac{\pi(\beta + g)}{\sin \pi \beta}$, $g = \frac{\text{Im}(\varepsilon_2)}{\text{Im}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}$, $f = \frac{\text{Re}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\text{Im}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}$, $\sigma_0 = \sigma(\varphi_0)$, φ_0 – угол

падения, соответствующий брэгговскому условию. Если при этом параметр β удовлетворяет условию $\text{tg}(\pi \beta_{\max}) = \pi(\beta_{\max} + g)$, то пиковый коэффициент отражения достигает своего максимального значения:

$$R_{max}^{s,p} = \frac{1-u_{min}^{s,p}}{1+u_{min}^{s,p}}; \quad u_{min}^{s,p} = \frac{1-\sigma_0^2 \cos^2 \pi \beta^*}{1+f^2 \sigma_0^2 \cos^2 \pi \beta^*} \quad (1.20)$$

Другим важным параметром многослойных рентгеновских зеркал является их разрешающая способность, которая определяется как $\Delta\lambda/\lambda_0$, где λ_0 – длина волны, соответствующая максимуму брэгговского пика, $\Delta\lambda$ – ширина брэгговского пика на полувысоте. На практике часто пользуются также величиной обратной, разрешающей способности, которая называется спектральной селективностью, и определяющейся, как $\lambda_0/\Delta\lambda$. При этом по порядку величины разрешающая способность приближенно равна числу эффективно работающих слоев: $\lambda_0/\Delta\lambda \approx (N_{eff})$. Глубина экстинкции L_{ex} , то есть расстояние, на которое излучение проникает в структуру может быть выражено через число эффективно работающих слоев:

$$L_{ex} = N_{eff} d \approx \frac{\lambda_0 \cos \theta_0}{\text{Im}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \text{tg}(\pi \beta_{max}) \sqrt{(1 - \sigma_0^2 \cos^2 \pi \beta_{max})(1 + f^2 \sigma_0^2 \cos^2 \pi \beta_{max})}} \quad (1.21)$$

Как было обозначено выше, одним из важных преимуществ метода медленных амплитуд является возможность сформулировать правила отбора материалов для конкретных задач. В случае, если главным требованием к структуре является получение максимального коэффициента отражения, то сначала выбирается слабопоглощающий материал, чтобы $\text{Im}(\varepsilon_2)$ был как можно меньше. Сильнопоглощающий материал при этом выбирается таким образом, чтобы отношение $|\text{Re}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)|/\text{Im}(\varepsilon_1)$ было как можно больше. Таким образом, при выборе сильнопоглощающего материала необходимо учитывать два эффекта: скачок диэлектрической проницаемости на границе раздела двух сред, а также поглощение в слоях. Число периодов в структуре при этом выбирается из условия $N > N_{eff}$.

При этом стоит отметить, что невозможно одновременно получить высокую разрешающую способность и максимально возможный коэффициент отражения. Если на практике требуется получить максимально возможное разрешение, то материалы следует выбирать так, чтобы параметр f был малым, а параметр g – большим.

После того, как материалы для многослойного зеркала выбраны, в рамках экспериментальных исследований проводится оптимизация структурных параметров под конкретную практическую задачу. Параметрами, которые

наилучшим образом можно контролировать в процессе синтеза структур, являются величина периода d , а также доля сильнопоглощающего материала в периоде β . При этом, если период структуры определяется рабочей длиной волны и углом падения излучения, то β оптимизируется для получения пикового коэффициента отражения или требуемой спектральной селективности, при которой коэффициент отражения не падает ниже допустимых значений. На рисунке 1.1 представлены расчетные зависимости спектральной селективности и коэффициента отражения для Ru/Y зеркала с периодом $d = 4,79$ нм, оптимизированном на рабочую длину волны $\lambda = 9,34$ нм при нормальном падении излучения. Видно, что максимальный коэффициент отражения составляет $R = 55.39\%$ и достигается при значениях $\beta = 0.4$. Однако значение спектральной селективности при этом может быть неудовлетворительным.

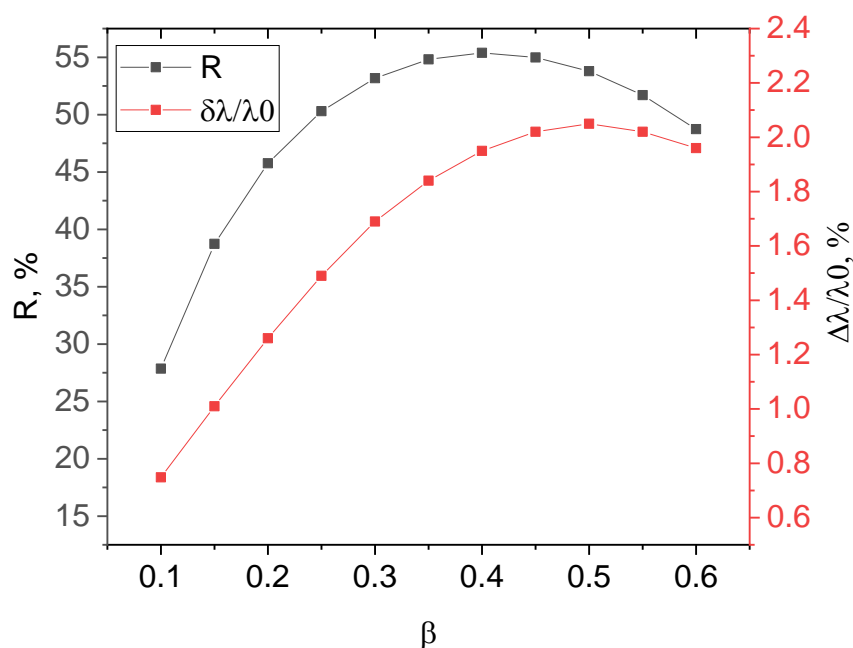


Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента отражения R и спектральной селективности $\Delta\lambda/\lambda_0$ от параметра β для Ru/Y многослойного зеркала, оптимизированного на длину волны 9,34 нм.

Метод медленных амплитуд является приближенным и позволяет описать отражение от структуры только вблизи резонанса. Для расчета коэффициента отражения от многослойной структуры при любом заданном угле падения излучения, длине волны, а также параметрах d и β , используется метод рекуррентных соотношений [27]. В рамках данного метода рассматривается падение

плоской монохроматической волны из вакуума на многослойную структуру, состоящую из N плоскопараллельных и изотропных слоев (рисунок 1.2). Таким образом, диэлектрическая проницаемость описывается кусочно-заданной функцией, и является постоянной в рамках каждого слоя. Обозначим через величину ε_j диэлектрическую проницаемость j -ого слоя, а через l_j его толщину. Выражение для векторов электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{B} поля будут иметь вид:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(z)e^{ikx\sin(\vartheta)-i\omega t}, \quad (1.22)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(z)e^{ikx\sin(\vartheta)-i\omega t}, \quad (1.23)$$

где $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$.

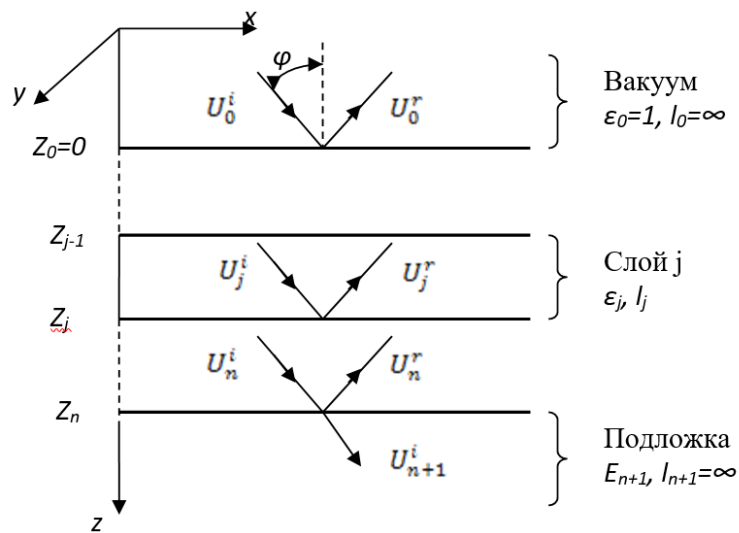


Рисунок 1.2 – Падение плоской монохроматической волны на многослойную структуру.

Для одновременного рассмотрения случая s-поляризации, когда ненулевыми компонентами являются E_y, H_x, H_z (вектор электрического поля лежит в плоскости слоев структуры) и p-поляризации, когда ненулевыми являются компоненты H_y, E_x, E_z (вектор магнитного поля лежит в плоскости слоев структуры), введем функцию $U(z)$: $U(z) = E_y(z)$ для s-поляризации и $U(z) = H_y(z)$ для p-поляризации. Внутри каждого j -ого слоя функция $U(z)$ удовлетворяет волновому уравнению:

$$U''(z) + \chi_j^2 U(z) = 0, \quad (1.24)$$

где $\chi_j = k\sqrt{\varepsilon_j - \sin^2\vartheta}$, $j = 0, 1, \dots, n + 1$. Условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного поля на границах слоев приводят к соотношениям:

$$U(z \rightarrow z_j - 0) = U(z \rightarrow z_j + 0), \quad (1.25)$$

$$\eta_j^{-1}U'(z \rightarrow z_j - 0) = \eta_{j+1}^{-1}U'(z \rightarrow z_j + 0), \quad (1.26)$$

где $\eta_j = 1$ для s-поляризации и ε_j для p-поляризации. Тогда решение волнового уравнения в j -ом слое запишем в виде суперпозиции волн, распространяющихся в сторону подложки и в сторону вакуума:

$$U(z) = U_j^i e^{i\chi_j(z-z_j)} + U_j^r e^{i\chi_j(z-z_j)}, \quad (1.27)$$

где индекс i соответствует падающей волне, а индекс r – отраженной. Если подставить данный вид решения в граничные условия, то можно получить систему уравнения для амплитуд падающей и отраженной волн:

$$(1.28) \quad \begin{cases} U_j^i + U_j^r = U_{j+1}^i e^{-i\chi_{j+1}l_{j+1}} + U_{j+1}^r e^{i\chi_{j+1}l_{j+1}}, \\ \frac{\chi_j}{\eta_j}(U_j^i - U_j^r) = \frac{\chi_{j+1}}{\eta_{j+1}}(U_{j+1}^i e^{-i\chi_{j+1}l_{j+1}} - U_{j+1}^r e^{i\chi_{j+1}l_{j+1}}) \\ U_{n+1}^r = 0 \end{cases}$$

Последнее уравнение означает, что в подложке существует только распространяющаяся вглубь нее волна. Для практических приложений важно получать значения коэффициента отражения и прохождения, которые могут быть выражены через отношения амплитуд прошедшей и отраженной волн:

$$r(z_j) = \frac{U_j^r}{U_j^i}, \quad (1.29)$$

$$t(z_j) = \frac{U_{j+1}^i}{U_j^i}, \quad (1.30)$$

где $j = 0, 1, \dots, n + 1$. Рекуррентные соотношения позволяют получить выражения для коэффициентов отражения и прохождения на j -ой границе через их значения на $j+1$ -ой границе:

$$r(z_j) = \frac{r_j^F + r(z_{j+1})e^{2i\kappa_{j+1}l_{j+1}}}{1 + r_j^F r(z_{j+1})e^{2i\kappa_{j+1}l_{j+1}}}, \quad (1.31)$$

$$r(z_{n+1}) = 0, \quad (1.32)$$

$$t(z_j) = \frac{t_j^F t(z_{j+1})e^{i\kappa_{j+1}l_{j+1}}}{1 + r_j^F r(z_{j+1})e^{2i\kappa_{j+1}l_{j+1}}}, \quad (1.33)$$

$$t(z_{n+1}) = 1, \quad (1.34)$$

где $j = 0, 1, \dots, n$, а величины r_j^F и t_j^F – это обычные амплитудные коэффициенты отражения и прохождения излучения на j -ой границе, определяемые формулами Френеля:

$$r_j^F = \frac{\kappa_j/\eta_j - \kappa_{j+1}/\eta_{j+1}}{\kappa_j/\eta_j + \kappa_{j+1}/\eta_{j+1}} = \frac{\eta_j^{-1} \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \vartheta} - \eta_{j+1}^{-1} \sqrt{\varepsilon_{j+1} - \sin^2 \vartheta}}{\eta_j^{-1} \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \vartheta} + \eta_{j+1}^{-1} \sqrt{\varepsilon_{j+1} - \sin^2 \vartheta}}, \quad (1.35)$$

$$t_j^F = \frac{2\kappa_j/\eta_j}{\kappa_j/\eta_j + \kappa_{j+1}/\eta_{j+1}} = \frac{2\eta_j^{-1} \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \vartheta}}{\eta_j^{-1} \sqrt{\varepsilon_j - \sin^2 \vartheta} + \eta_{j+1}^{-1} \sqrt{\varepsilon_{j+1} - \sin^2 \vartheta}}. \quad (1.36)$$

Рекуррентная процедура подразумевает под собой последовательное нахождение коэффициентов отражения на каждой границе, при этом счет начинается с подложки ($j = n$). Выражения для коэффициента отражения и пропускания от всей структуры имеют вид:

$$R = |r(z_0)|^2, \quad (1.37)$$

$$T = |t(z_0)|^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\kappa_{N+1}}{k\eta_{j+1} \cos \vartheta} \right). \quad (1.38)$$

Таким образом, можно заключить, что для проведения предварительных оценок отражательных характеристик многослойного рентгеновского зеркала сначала необходимо осуществить выбор материалов структуры, исходя из принципов, полученных из метода медленных амплитуд, а, затем, для конкретных структурных параметров провести расчет методом рекуррентных соотношений.

Стоит отметить, что для структуры, состоящей из любых материалов, коэффициент отражения будет меньше единицы в силу поглощения излучения в структуре. Данный эффект относится к фундаментальным свойствам материалов и накладывает ограничение на максимальное теоретически возможное значение коэффициента отражения, которое невозможно превзойти на практике. Однако

значения коэффициента отражения реальных структур получаются ниже теоретического предела, что обусловлено тем фактом, что приведенный выше расчет методом рекуррентных соотношений относится к идеальным структурам и не учитывает все факторы, влияющих на отражательные характеристики.

Одним из таких факторов является межслоевая шероховатость, которая образуется в процессе синтеза многослойных структур. Ее учет в простом случае при расчете коэффициента отражения осуществляется путем умножения коэффициента отражения идеальной структуры на экспоненциальный множитель Дэбая – Валлера [28]:

$$R = R_{id} e^{-\left(\frac{4\pi\sigma\cos(\vartheta)}{\lambda}\right)^2}, \quad (1.39)$$

где R_{id} – коэффициент отражения идеальной структуры (с нулевыми шероховатостями), σ – среднеквадратичная величина шероховатостей, φ – угол падения излучения на структуру, λ – длина волны падающего излучения. Используя условие Брэгга – Вульфа, выражение для коэффициента отражения с учетом шероховатостей может быть приведено к виду:

$$R = R_{id} e^{-\left(\frac{2\pi n\sigma}{d}\right)^2}, \quad (1.40)$$

где n – порядок брэгговского пика, d – период многослойной структуры. Исходя из вида полученного выражения можно сделать 2 вывода. Во-первых, чем выше номер брэгговского пика, тем выше влияние шероховатости на его высоту. Это стоит учитывать при анализе зависимостей коэффициента отражения от угла падения излучения в области жесткого рентгеновского диапазона длин волн. Во-вторых, шероховатости особенно сильно сказываются на отражательной способности структур с малыми периодами. Для демонстрации данных эффектов был проведен расчет коэффициентов отражения для Mo/B₄C многослойных зеркал с периодами, оптимизированными на нормальное падение для длин волн в диапазоне от 6,7 до 12 нм, в случае нулевых шероховатостей (R_{id}) и в случае, когда на обеих границах задавалась шероховатость, равная $\sigma = 0,3$ нм (R_{real}). На рисунке 1.3 представлена зависимость отношения R_{real}/R_{id} от периода структуры. Из представленной зависимости видно, что данное отношение растет с уменьшением периода.

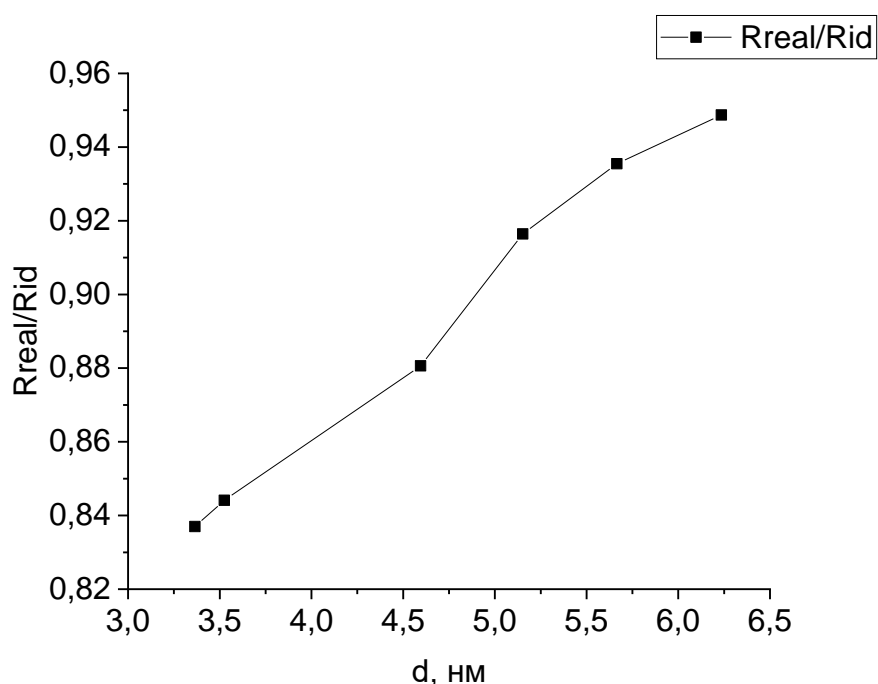


Рисунок 1.3 – Зависимость отношения коэффициентов отражения Mo/W₄C многослойной структуры с шероховатостями 0,3 нм на обеих границах и нулевыми шероховатостями от периода структуры.

Стоит отметить, что определенные выше шероховатости (также называемые геометрическими) как неровности рельефа не изменяют общего потока фотонов, а лишь снижают отражение в зеркальном направлении и приводят к рассеянию излучения в углы, отличные от зеркального. Другим типом шероховатостей являются диффузные шероховатости, обусловленные перемешиванием материалов на границе их раздела в силу процессов диффузии и химического взаимодействия. Это приводит к уменьшению модуляции электронной плотности вглубь структуры, в результате чего амплитуда первой гармоники в разложении в ряд Фурье на границах начинает уменьшаться, что, в свою очередь приводит к уменьшению отражения на каждой границе (см. формулу 1.17), но не приводит к рассеянию излучения на углы, отличные от зеркального. В силу уменьшения отражения на каждой границе за счет уменьшения модуляции профиля электронной плотности, увеличивается эффективно работающее число слоев в структуре (см. формулу 1.21), что в свою очередь приводит к сужению брэгговского пика и уменьшению его величины. Данный эффект возможно частично компенсировать за счет увеличения числа слоев в структуре, однако даже в этом случае коэффициент отражения будет

ниже, чем для идеальной структуры, в силу поглощения излучения в слоях. Следовательно, необходимо использовать специальные методики уменьшения шероховатостей и толщин переходных интерфейсов в межслоевой области. Среди таких методов широко распространены методы ионной полировки, а также нанесение барьерных слоев.

Другим эффектом, оказывающим негативное влияние на отражательные характеристики многослойных рентгеновских зеркал, является разброс толщин слоев, а также монотонное изменение периода по глубине структуры. Отклонение периода от заданного значения приводит к снижению коэффициента отражения, а также к уширению брэгговского пика. Допустимое отклонение периода от заданного Δd можно оценить, как $\Delta d \approx d/N_{\text{eff}}$. Для удовлетворения данного условия необходимо обеспечивать высокую стабильность технологических параметров во время синтеза, что является одной из главных задач в процессе роста тонких пленок.

К эффектам, оказывающим негативное влияние на отражательные характеристики зеркал, также относятся окисление слоев структуры и наличие примесей. Данные эффекты оказывают наибольшее влияние в тех спектральных диапазонах, где они обладают сильным поглощением.

Таким образом, из сказанного выше можно сделать несколько важных выводов об аспектах, которые необходимо учитывать при расчете и синтезе многослойных рентгеновских зеркал для прикладных задач. Во-первых, необходимо выбрать спектральный диапазон, а также диапазон углов, в котором должна работать структура. Это позволяет провести расчет необходимого периода зеркала. Далее, в соответствии с правилами, сформулированными в рамках метода медленных амплитуд, выбрать материалы, на основе которых будет синтезировано зеркало. В рамках предварительного расчета имеет смысл заложить параметры (шероховатости, уход периода), которые могут иметь место для реальной структуры, чтобы предварительно оценить ее отражательные характеристики. Во время синтеза необходимо обеспечивать стабильность технологического процесса для минимизации негативных эффектов.

1.2 Установка для синтеза МРЗ

Исследуемые в данной работе многослойные зеркала синтезировались методом магнетронного распыления на установке, основная часть которой подробно описана в [29]. Схема установки представлена на рисунке 1.4.

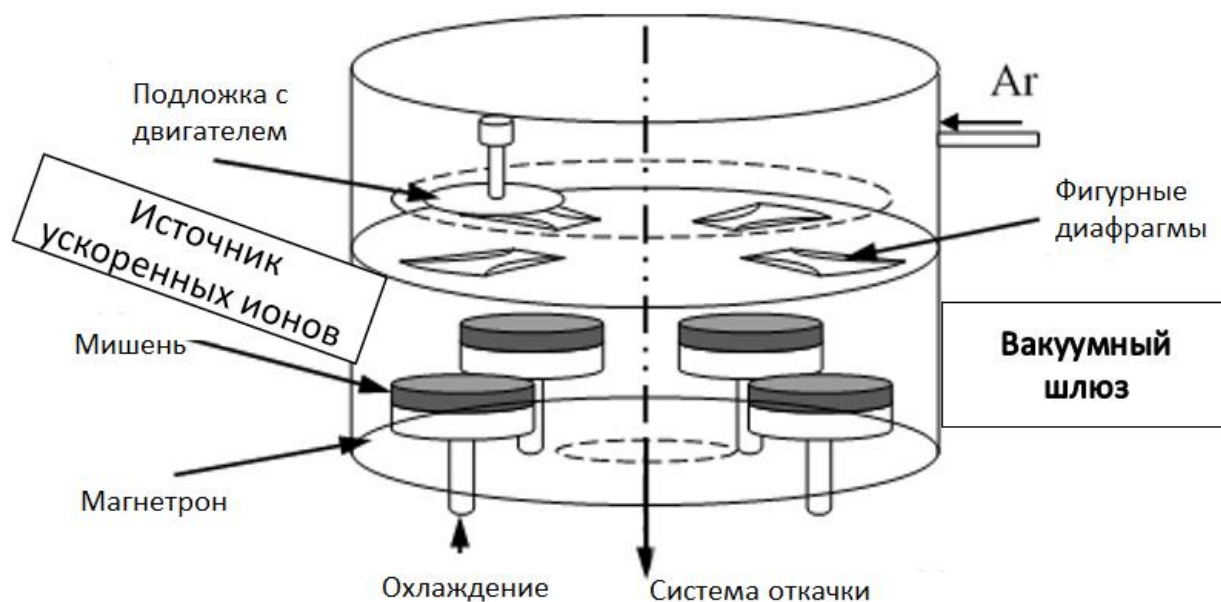


Рисунок 1.4 – Схема экспериментальной установки.

Данная установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру, высотой 0.5 м и диаметром 0.8 м, оснащенную четырьмя магнетронами планарного типа, на которых находятся мишени распыляемого вещества. В ходе технологического процесса подложка поочередно проходит над каждым магнетроном, что позволяет в ходе одного рабочего процесса послойно наносить до 4 различных веществ в одной структуре. Это особенно важно, когда в двухкомпонентную структуру требуется добавить барьерные слои на различные границы в структуре. Между подложкой и магнетронами находятся специальные фигурные диафрагмы, лежащие на металлических кожухах. Форма диафрагм задает распределение распыляемого вещества на подложке. В зависимости от задач может потребоваться обеспечить как равномерное распределение вещества по поверхности подложки, так и распределение с заданным законом. Пример такой диафрагмы, задающей равномерное распределение периода по координате вдоль поверхности образца, приведен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Пример фигурной диафрагмы, задающий равномерное распределение распыляемого вещества на подложке

Круговое движение подложки обеспечивается шаговым двигателем. Скорость прохождения подложки над магнетронами определяет толщину слоя, наносимого на подложку за один проход. Питание магнетронов обеспечивается источниками стабилизированного тока, разработанными в ИФМ РАН. Токи в разряде могут варьироваться от 100 мА до 2000 мА, напряжения при этом обычно находятся на уровне 200 – 400 В. Синтез зеркал происходит при давлении рабочего газа аргона $7 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ торр. В качестве рабочего газа, как правило, используется высокочистый аргон (99,998%). Напуск рабочего газа в вакуумную камеру осуществляется через регулятор расхода газа РРГ-12, который позволяет контролировать расход газа из баллона, а, следовательно, давление в вакуумном объеме.

Перед процессом напыления вакуумная камера откачивалась до давления остаточных газов на уровне 10^{-7} торр. Предварительная откачка камеры до давления

10^{-2} торр осуществляется безмасляным форвакуумным насосом марки Anest Iwata (500 л/мин), высоковакуумная – турбомолекулярным безмасляным насосом марки Shimadzu (2000 л/с).

Стоит отметить, что в первоначальном варианте установки процесс откачки остаточных газов с атмосферного до рабочего давления занимает несколько часов, что фактически не позволяет синтезировать больше одного зеркала в течение рабочего дня. А для МРЗ, состоящих из нескольких сотен периодов с такой откачкой могло не хватить и рабочего дня. При работе с такими химически активными материалами, как стронций и лантан, попадание атмосферных газов в вакуумный объем приводит к быстрой деградации (окислению) мишеней. Помимо быстрого износа дорогостоящих мишеней это приводило к нестабильности работы магнетронных распылителей – как следствие, страдало качество изготавливаемых зеркал.

Другая проблема магнетронного распыления – это нанесение диэлектрических пленок. Практика показала, что из-за низкой скорости распыления с использованием даже высокочастотного разряда над магнетронами пленки получаются «рыхлыми», то есть их плотность существенно ниже табличной, а поверхностная шероховатость существенно выше, чем у подложки. Также страдала воспроизводимость толщин пленок в различных периодах в процессе длительного синтеза образцов.

Еще одна проблема возникала при нанесении отражающих покрытий для разрабатываемых в настоящее время микро-электро-механических систем микрозеркал (МЭМС) для рентгеновского диапазона [30]. Так как нанесение отражающего рентгеновское излучение многослойного покрытия на кремниевую пластину происходило в середине процесса изготовления МЭМС, то к покрытиям предъявлялись требования на количество допустимых пылинок на поверхности. В стандартной установке вакуумного напыления достичь этого параметра не удавалось, так как в начале откачки вакуумной камеры в ней поднимается «пыль», возникающая из-за отслоения пленок от элементов конструкции вакуумной камеры, на которые попадает материал при работе магнетронных распылителей.

Для решения обозначенных выше проблем, в рамках диссертационной работы была проведена модернизация установки. Модернизация включала следующие мероприятия. Во-первых, установка была оснащена специальным вакуумным шлюзом, отделенным вакуумным затвором от основного объема. Схематичное изображение вакуумного шлюза приведено на рисунке 1.6.

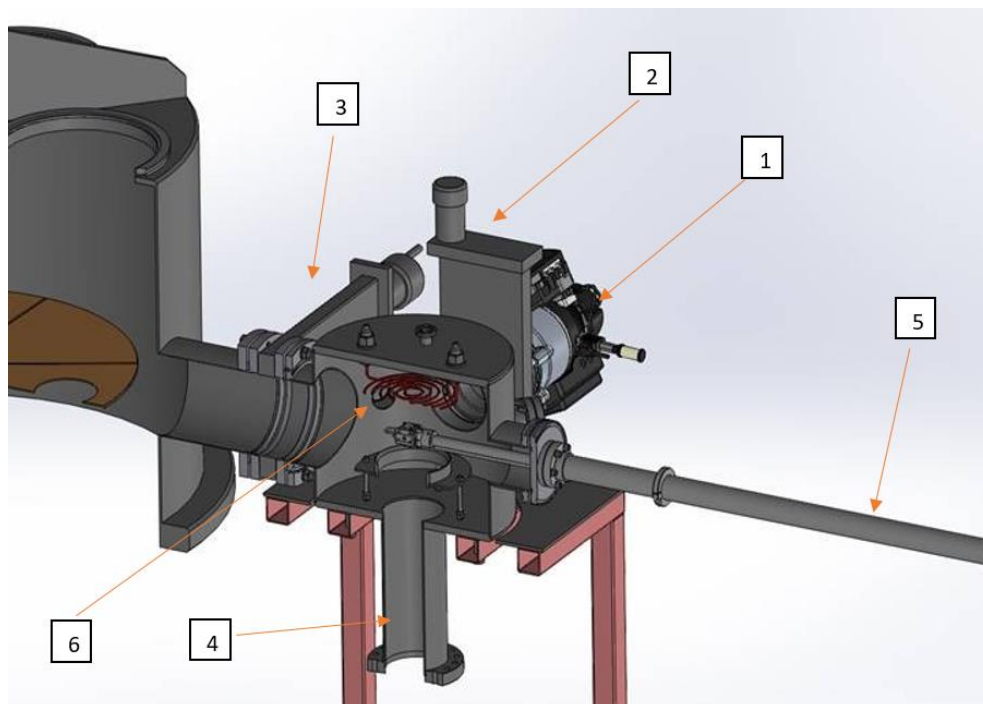


Рисунок 1.6 – Схема шлюзовой камеры. 1 – турбомолекулярный насос, 2,3 – шиберные затворы, 4 – источник ускоренных ионов, 5 – вакуумный манипулятор, 6 – нагревательный тэн.

Перед синтезом структуры подложка загружается в шлюз, после чего происходит его откачка до высокого вакуума. Стоит отметить, что требуемое давление остаточных газов в шлюзе достигается существенно быстрее, чем в основной камере, за времена порядка 30 минут. После чего открывается затвор между рабочей и шлюзовой камерами, и с помощью специального манипулятора подложка загружается в основной объем, предварительно откаченный до высокого вакуума. После этого манипулятор удаляется из основного вакуумного объема, и вакуумный затвор между основным и шлюзовым объемами закрывается. Выгрузка подложки с нанесенной на нее многослойной структурой из основной вакуумной камеры по окончании технологического процесса осуществляется в обратном порядке. Таким образом, использование шлюзовой камеры позволяет исключить

попадание атмосферных газов в рабочий объем при перезагрузке, что в свою очередь позволяет синтезировать по несколько образцов в течение одного рабочего дня, а также повышает качество самих образцов и защищает химически активные мишени от окисления и разрушения. Общий вид экспериментальной установки с вакуумным шлюзом и отдельно шлюз с вакуумным затвором представлены на рисунке 1.7. и рисунке 1.8.

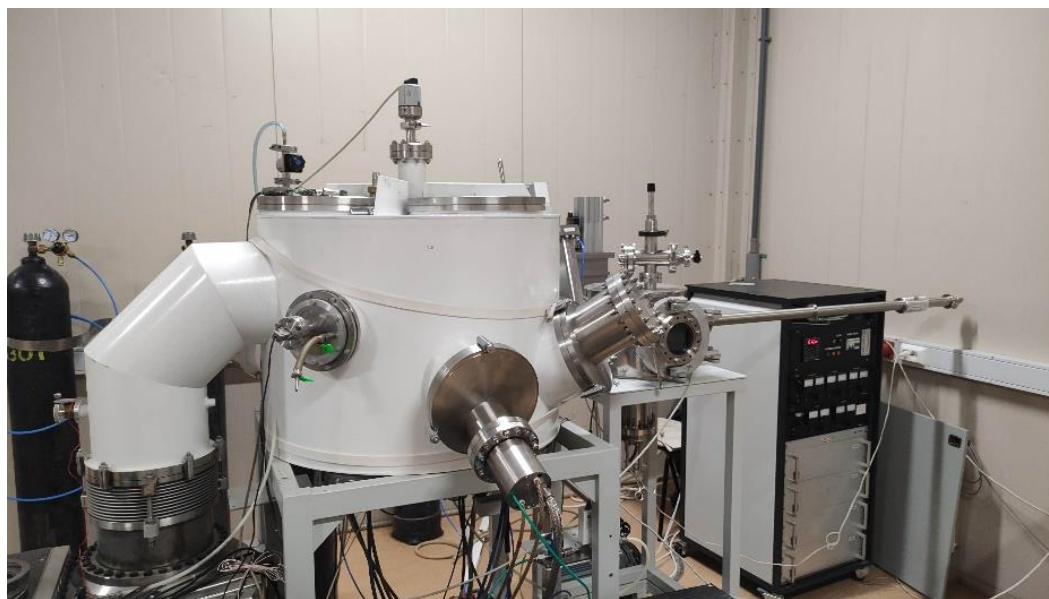


Рисунок 1.7 – Общий вид установки.



Рисунок 1.8 – Вакуумный шлюз с затвором, отсекающим шлюзовую камеру от основного вакуумного объема, в котором происходит синтез зеркал.

Для распыления мишеней, в том числе и из диэлектрических материалов, установка была оснащена источником ускоренных ионов КЛАН 104-М производства ООО «Платар» (г. Москва). На рисунке 1.9 представлена фотография такого источника в защитном кожухе, на рисунке 1.10 – без кожуха, на рисунке 1.11 – ее принципиальная схема.

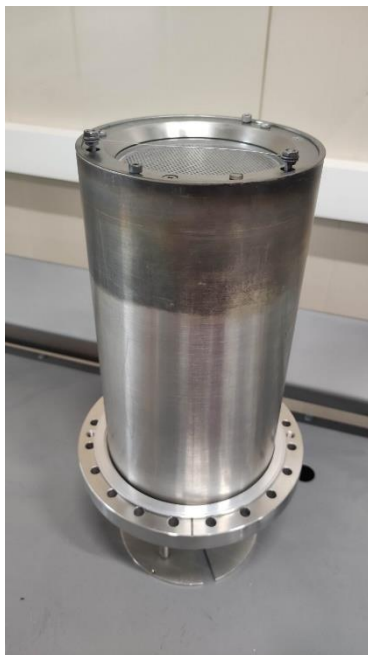


Рисунок 1.9 – Источник ускоренных ионов в защитном кожухе.

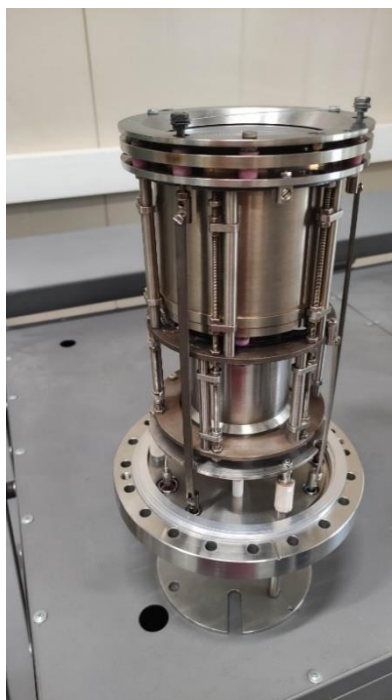


Рисунок 1.10 – Источник ускоренных ионов без защитного кожуха

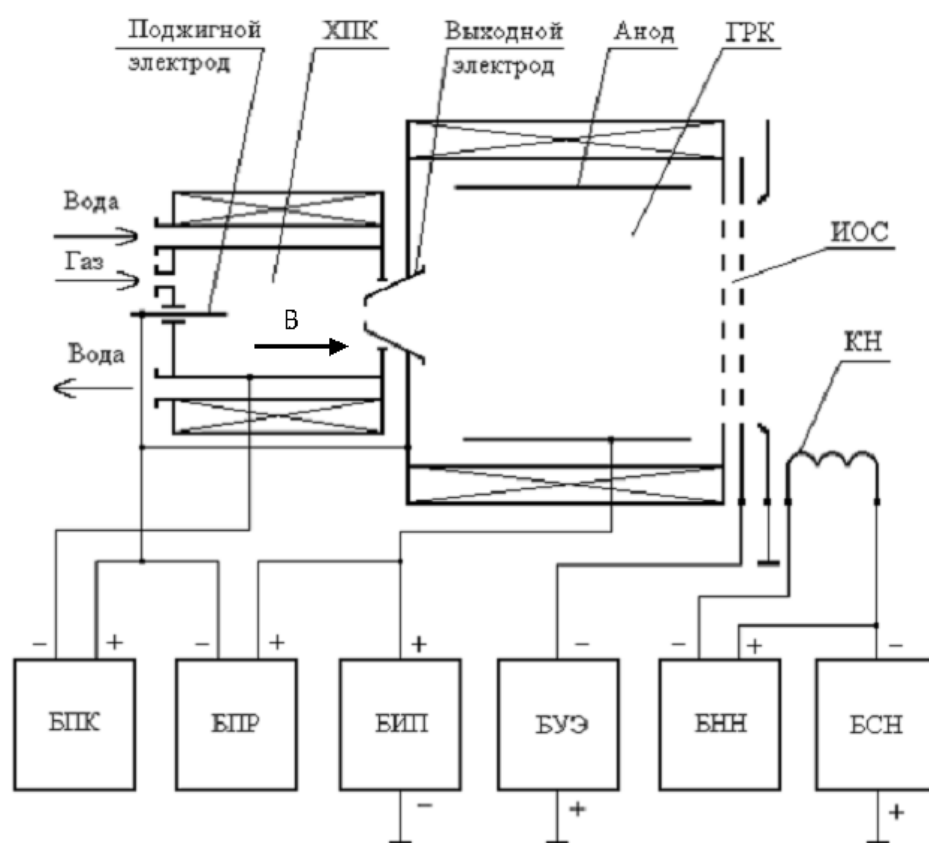


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема работы источника ускоренных ионов.

Принцип действия источника заключается в следующем. Через специальную систему напуска газа (упомянутый выше РРГ-12) осуществляется напуск рабочего газа (аргон) в камеру холодного полого катода, после чего при подаче напряжения на поджигной и выходной электроды относительно корпуса катода в катоде зажигается самостоятельный тлеющий разряд. Первичные электроны ускоряются на прикатодном падении потенциала и, осциллируя в магнитном поле (на схеме обозначено буквой В) внутри корпуса, ионизируют атомы рабочего газа. Ионы, образующиеся при ионизации, движутся на стенки холодного полого катода, а электроны – на поджигной и выходной электроды. При подаче на анод газоразрядной камеры напряжения относительно входного электрода катода, часть электронов через отверстие в выходном электроде поступает в газоразрядную камеру и обеспечивает поддержание несамостоятельного разряда в камере. Электроны в дальнейшем выпадают на анод, а ионы, образующиеся при ионизации

газа в газоразрядной камере, частично выпадают на эмиссионный электрод и частично на стенки корпуса газоразрядной камеры, имеющих потенциал катода.

При подаче положительного относительно земли потенциала на анод и отрицательного относительно земли потенциала на управляющий электрод ионы, попадающие в отверстия эмиссионного электрода ионно-оптической системы, ускоряются в ионно-оптической системе и образуют на выходе из нее ионный пучок.

Объемный положительный заряд ионного пучка нейтрализуется электронами, поступающими с катода-нейтрализатора, представляющего собой вольфрамовую нить, при подаче на него напряжения накала. Для отвода тепла от элементов конструкции (в первую очередь от магнитной системы) в источнике также реализована водяная система охлаждения.

В рамках данной диссертационной работы метод ионно-пучкового распыления был использован для распыления мишени бора при синтезе многослойных структур Ru/B. При этом ток ионного пучка составлял 60 мА, энергия ионов – 800 эВ.

Управление технологической установкой напыления осуществляется с помощью разработанного в ИФМ РАН программного обеспечения для компьютера и блока микроконтроллеров. Отображение всех данных, а также управление приборами осуществляется через графический интерфейс, написанный на языке программирования Java с использованием библиотек Swing и AWT. Связь между компьютером и центральным контроллером осуществляется через TCP/IP socket. Все команды, отправляемые от компьютера к центральному контроллеру, имеют размер 3 байта (опционально может быть увеличен), где нулевой байт соответствует заголовку команды, а остальные байты – значению. В случае команд запроса данных или команды типа включить/выключить, значению присваиваются нули. На центральном контроллере открывается server socket, который ждет входящей команды от компьютера (клиента), после получения которой происходит ее переадресация на соответствующий периферийный контроллер, непосредственно управляющий прибором, которому предназначается команда. Между центральным и периферийными контроллерами организуется связь типа master – slave. В массив байт команды также добавляется стартовый байт, стоповый байт и байт контрольной

суммы. Если центральный контроллер не дожидается ответа от периферийного в течение заданного промежутка времени, он отправляет команду повторно. В случае отсутствия ответа от периферийного контроллера или неверного подсчета контрольной суммы master передает на компьютер соответствующее сообщение. Связь периферийного контроллера с РРГ-12, турбомолекулярным насосом, вакууметром Erstevac и блоками питания магнетронов осуществляется по интерфейсам RS-232 и RS-485. Управление вакуумными клапанами и форвакуумным насосом осуществляется путем коммутации цепи через твердотельное реле. Управление шаговым двигателем осуществляется с помощью подачи синхроимпульсов с выходов контроллера на драйвер двигателя. Скорость движения контролируется путем изменения частоты прерываний по таймеру, генерация синхроимпульсов происходит в коде прерывания. Для управления шаговым двигателем также была написана своя библиотека.

Стоит отметить, что разработанная система показала хорошую отказоустойчивость, а также долгосрочную работу без сбоев. При этом система оснащена возможностью перезагрузки без прерывания рабочего процесса. Все параметры процесса, такие как токи и напряжения магнетронов, давление газа в вакуумном объеме, текущая координата и скорость вращения подложки отображаются в окнах графического интерфейса, а также сохраняются в файл, что позволяет оператору установки при необходимости проанализировать значения параметров, а также их изменение во времени.

1.3 Аппаратура и методы исследования МРЗ

В жестком рентгеновском диапазоне отражательные характеристики синтезированных образцов измерялись на четырехкристальном дифрактометре Panalitical X'Pert PRO, который позволяет проводить исследование структур методом малоугловой дифракции. Фотография дифрактометра приводится на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Фотография четырехкристального дифрактометра Panalitical X'Pert PRO.

На рисунке 1.13 указана принципиальная схема дифрактометра.

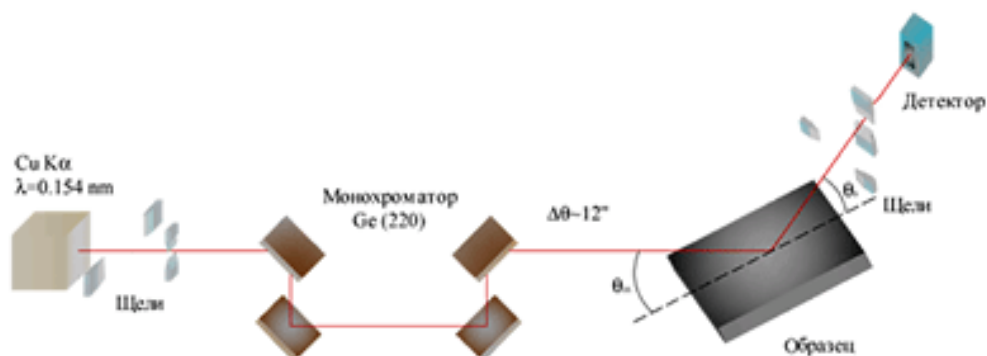


Рисунок 1.13 – Схема установки дифрактометра.

Источником рентгеновского излучения с длиной волны Cu K α $\lambda = 0,154 \text{ нм}$ служит рентгеновская трубка (напряжение 30 кВ, ток 20 мА) с медным анодом. Спектральная и угловая монохроматизация зондового пучка осуществляется с помощью четырехкристального асимметричного монохроматора Ge (220). Образец устанавливается на стол с 6-ю степенями свободы, что позволяет изучать коэффициенты отражения локально по всей поверхности образца. Данный дифрактометр позволяет регистрировать как кривые зеркального отражения, так и кривые диффузного рассеяния. Использование высокоразрешающего бездисперсионного монохроматора обусловлено необходимостью выделения из дублета характеристической линии Cu K α_1 $\lambda = 0,1540562 \text{ нм}$ и обеспечения плоскопараллельности зондового пучка в дисперсионной плоскости исследуемых МРЗ на уровне единиц угловых секунд.

Исследование образцов МРЗ в диапазоне мягкого рентгеновского излучения проводилось на лабораторных рефлектометрах, оснащенных решеточными монохроматорами скользящего падения РСМ-500 [31] и Черни-Тернера [32] и 5-ти-осными гониометрами, позволяющими изучать образцы с произвольной формой поверхности. В качестве источника мягкого рентгеновского излучения в первом случае использовались разборные рентгеновские трубки, которые позволяют работать на характеристических линиях материала анода. Во втором случае использовался лазерно-плазменный источник излучения, который позволяет измерять как угловые, так и спектральные зависимости коэффициента отражения. Фотография рефлектометра на основе монохроматора Черни-Тернера приведена на рисунке 1.14. Рефлектометры обеспечивают рабочий диапазон длин волн 5-60 нм и

спектральное разрешение до 0,01 нм. Точность измерений коэффициентов отражения/пропускания составляет $\pm 0,8\%$.



Рисунок 1.14 – Лабораторный рефлектометр.

Для подтверждения результатов лабораторных измерений, синтезированные образцы также исследовались на синхротронах BESSY-II (рисунок 1.15) [33, 34] и КИСИ [35].

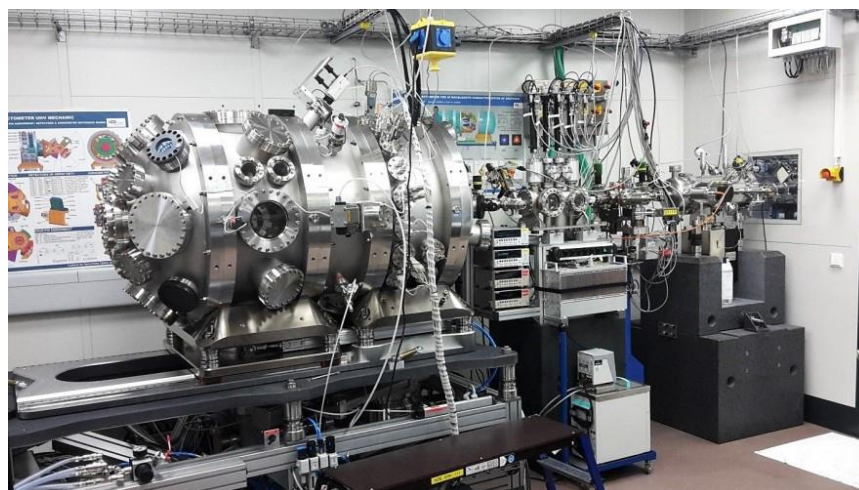


Рисунок 1.15 – Измерительная часть на синхротроне BESSY-II.

Восстановление структурных параметров синтезированных образцов осуществлялось с помощью программного обеспечения Multifitting, разработанного

в ИФМ РАН [36, 37]. Данная программа позволяет проводить расчет спектральных и угловых зависимостей коэффициента отражения от модельной структуры путем решения системы рекуррентных соотношений, о которой подробно было написано в первой главе, а также осуществлять одновременную подгонку нескольких экспериментальных кривых. Чем большее количество кривых одновременно обрабатывается программой, тем более близкими к реальным будут являться полученные значения структурных параметров модельной структуры. Поэтому, как правило, для определения структурных параметров синтезированного образца одновременно проводится подгонка кривых отражения, измеренных как в области жесткого, так и мягкого рентгеновского излучения. Параметрами структуры, определяемыми в ходе подгонки, являются ее период, толщины материалов в периоде, ширина переходных областей, плотности материалов. На основании полученных структурных параметров представляется возможным провести расчет отражательных характеристик структуры в других спектральных и угловых диапазонах.

Одним из главных преимуществ данной программы является учет размытия границ слоев в структуре (межслоевых интерфейсов), который задается через суперпозицию функций зависимости профиля диэлектрической проницаемости от координаты вглубь образца. Параметр S имеет смысл ширины переходной области. Примеры используемых в программе профилей приведены ниже:

Функция ошибок (“erf”): $f_1(z, S) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2S}} \right) \right)$

Линейный (“lin”): $f_2(z, S) = \begin{cases} 0, & z \leq -\sqrt{3} S \\ \frac{1}{2} + \frac{z}{2\sqrt{3} S}, & -\sqrt{3} S < z < \sqrt{3} S \\ 1, & z \geq \sqrt{3} S \end{cases}$

Экспоненциальный (“exp”): $f_3(z, S) = \begin{cases} \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\sqrt{2}}{S} z\right), & z \leq 0 \\ 1 - \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\sqrt{2}}{S} z\right), & z > 0 \end{cases}$

Гиперболический тангенс (“tanh”): $f_4(z, S) = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh\left(\frac{\pi z}{2\sqrt{3}S}\right) \right)$

$$\text{Синусоидальный ("sin")}: f_5(z, S) = \begin{cases} 0, & z \leq -\gamma S \\ \frac{1}{2} + \sin\left(\frac{\pi z}{2\gamma S}\right), & -\gamma S < z < \gamma S \\ 1, & z \geq \gamma S \end{cases}; \quad \gamma = \pi / \sqrt{\pi^2 - 8}$$

$$\text{Ступенчатый ("step")}: f_6(z, S) = \begin{cases} 0, & z \leq -S \\ \frac{1}{2}, & -S < z < S \\ 1, & z \geq S \end{cases}$$

Помимо зеркальных кривых, в программе Multifitting также представляется возможным проводить анализ кривых диффузного рассеяния для разделения вкладов перемешивания слоев и геометрических шероховатостей в кривые отражения.

Практически все плёнки, вне зависимости от способа их получения, обладают внутренним напряжением. Напряжения в пленке (сплошной или многослойной) могут быть растягивающими, когда пленка как бы старается сжаться на подложке – сила противодействует сжатию, «растягивает» пленку и направлена от центра подложки к периферии. В этом случае напряжению приписывать знак «плюс». Напряжения могут иметь и сжимающий характер – силы направлены от периферии к центру. Тогда принято говорить об отрицательных напряжениях и приписывать с «минус». При знаке «плюс» система пленка+подложка принимает вогнутый характер, при знаке «минус» - выпуклый, пленкой вовне.

Наличие внутренних напряжений в многослойных структурах может привести к деформациям формы оптических элементов, что, в свою очередь может привести к отклонению хода лучей от расчетного, а также к отслаиванию структуры от подложки. Данные обстоятельства являются особенно важными в тех случаях, когда невозможно провести замену зеркала в оптической схеме (орбитальные телескопы, расположенные на спутниках), или, когда сложность изготовления и стоимость структур крайне высока (микроэлектромеханические системы для проекционной литографии). Таким образом, при синтезе структур необходимо уделять существенное внимание вопросу изучения внутренних напряжений.

Для определения внутренних напряжений используется формула Стони:

$$\sigma = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{\text{подл}}^2}{d_{\text{пл}}} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (1.41)$$

где σ – напряжения, E – модуль Юнга материала пластины, ν – коэффициент Пуассона материала пластины, $d_{\text{подл}}$ – толщина подложки, $d_{\text{пл}}$ – толщина пленки, R_1 – исходный радиус кривизны подложки, R_2 – радиус кривизны подложки после осаждения пленки. Таким образом, задача сводится к измерению радиуса кривизны исходной поверхности и радиуса кривизны поверхности после нанесения на нее многослойной структуры. Для решения данной задачи использовался лазерный интерферометр Zygo VeriFire 4 с плоским эталонным фронтом. Прибор показан на рисунке 1.16.

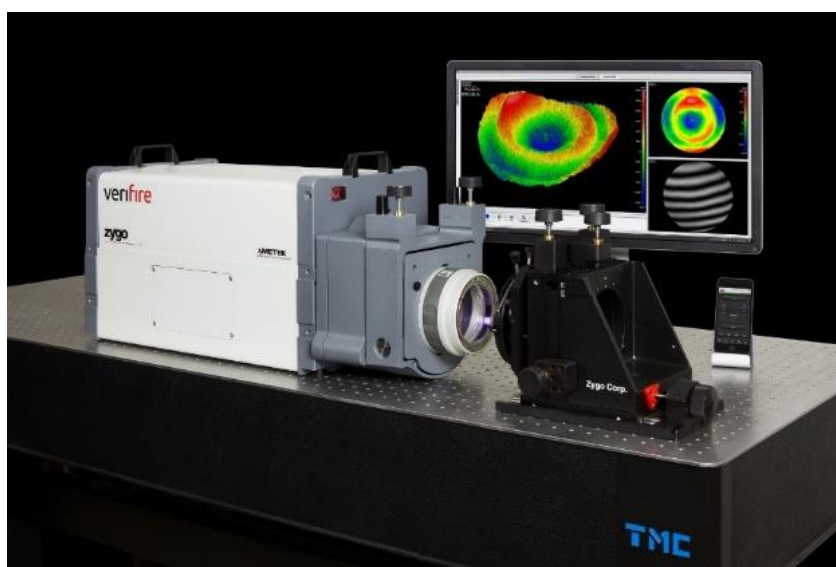


Рисунок 1.16 – Интерферометр Zygo VeriFire 4.

В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер. Пропускающий эталонный элемент, установленный перед выходной апертурой, отражает часть света обратно в интерферометр, создавая опорный волновой фронт. Другая часть лазерного света проходит через элемент и отражается от исследуемой поверхности, формируя измерительный фронт. Наложение двух фронтов формирует интерференционную картину, выражающуюся в изображении темных и светлых полос. Далее на основании полученной интерференционной картины восстанавливается форма поверхности исследуемого образца. Максимальное отклонение формы структуры от плоскости, которое позволяет определять данный

интерферометр, составляет 15 мкм. При этом абсолютная погрешность определения профиля составляет 10 нм. Схема интерферометра приведена на рисунке 1.17.

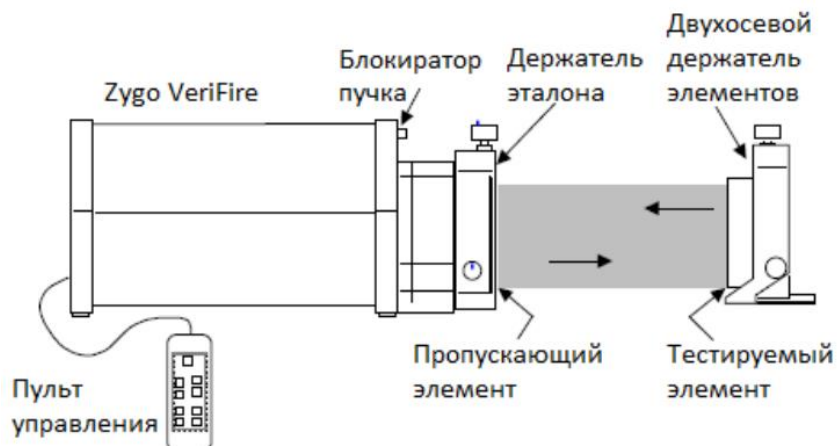


Рисунок 1.17 – Схема интерферометра Zygo VeriFire 4.

На рисунке 1.18. приведен результат измерений интерферометра: была получена карта поверхности, а также профиль поверхности по выбранному срезу.

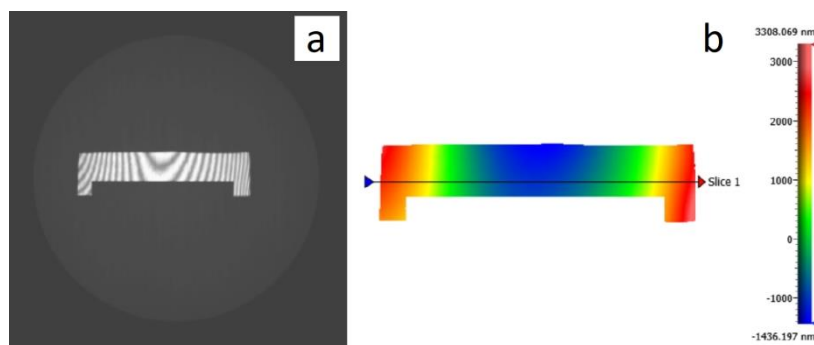


Рисунок 1.18 – Результат измерений интерферометра.

Радиус кривизны определяется из профиля поверхности по следующей формуле:

$$R = \frac{h}{2} + \frac{c^2}{8h}, \quad (1.42)$$

где h – высота хорды, c – длина хорды (рисунок 1.19). Подставляя данное выражение в формулу Стони можно получать значение для величины внутренних напряжений.

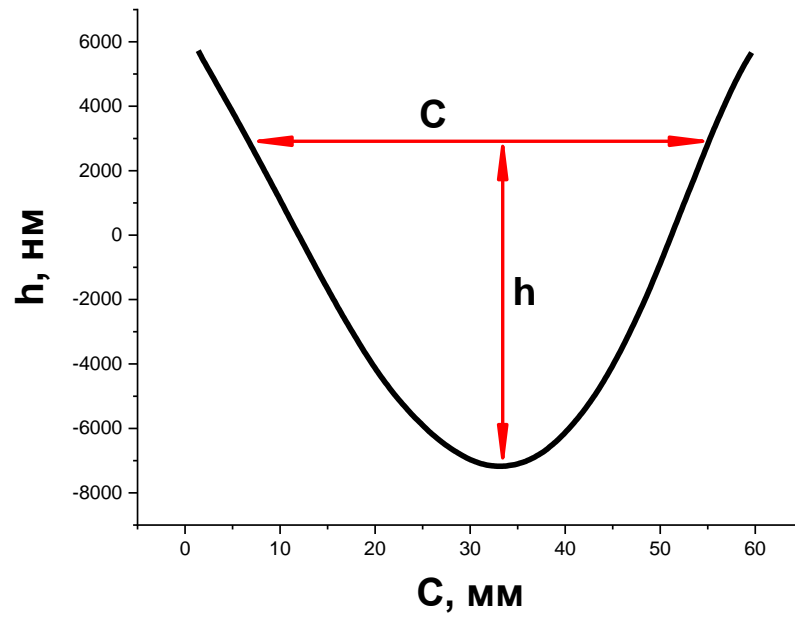


Рисунок 1.19 – Пример профиля поверхности, полученный в результате интерферометрических измерений.

1.4 Основные результаты по главе 1

1) Проведена комплексная модернизация установки магнетронного напыления. Установлена шлюзовая камера, позволяющая работать с мишенями химически активных материалов и улучшающая стабильность процесса синтеза зеркал. Введение в эксплуатацию источника ускоренных ионов позволяет проводить распыление диэлектрических материалов, в частности бора.

Глава 2. Многослойные зеркала для спектрального диапазона 4,4-9 нм

2.1 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 4,4-6,6 нм

Одним из важных практических приложений многослойных рентгеновских зеркал является микроскопия «углеродного окна», длины волн 4,4 – 6,6 нм. На рисунке 2.1 приведены зависимости действительной (δ) и мнимой (γ) частей показателя преломления n углерода и бора, $n = 1 - \mu + i \cdot \nu$:

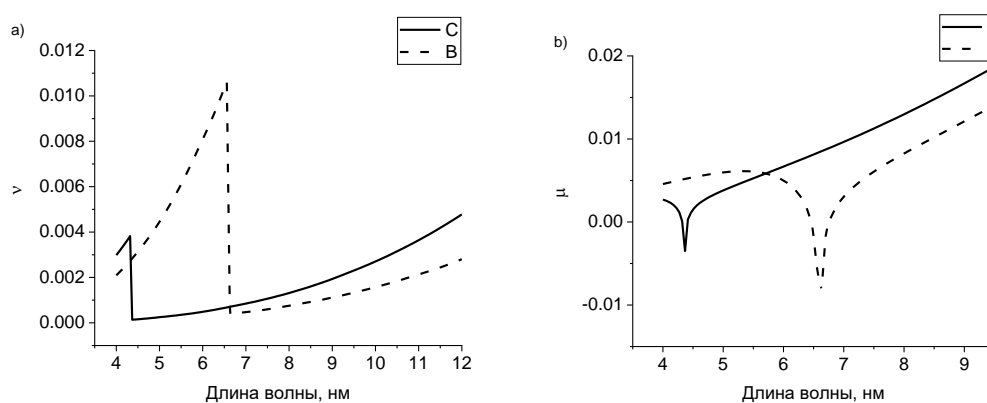


Рисунок 2.1 – Зависимость мнимой ν (a) и действительной μ (b) частей показателя преломления углерода (сплошная кривая) и бора (пунктирная кривая).

Исходя из представленных зависимостей видно, что ν , определяющая коэффициент поглощения углерода, резко падает при значениях длин волн больше 4,4 нм, что связано с наличием К-края поглощения углерода. В то же время на длинах волн больше 6,6 нм меньшим поглощением обладает бор, что связано с наличием в данной области К-края поглощения бора. Таким образом, диапазон длин волн, ограниченный краями поглощения углерода и бора, называют окном прозрачности углерода, в котором данный материал обладает одной из наименьших величин поглощения. Следовательно, углерод может быть выбран в качестве слабопоглощающего материала для структур, оптимизированных на работу в «углеродном окне». В качестве сильнопоглощающего материала в пару к нему, как показывают расчеты, могут быть выбраны такие материалы, как никель, хром, кобальт. На рисунке 2.2 приведен график зависимости коэффициента отражения многослойных рентгеновских зеркал на основе пар материалов Ni/C, Cr/C и Co/C от длины волны. Расчет был проведен для зеркал с рабочими углами скольжения 90

градусов. Также в рамках проведенного расчета предполагалось, что структуры обладали нулевыми межслоевыми шероховатостями и табличными значениями плотностей материалов, то есть расчет проводился для идеальных структур.

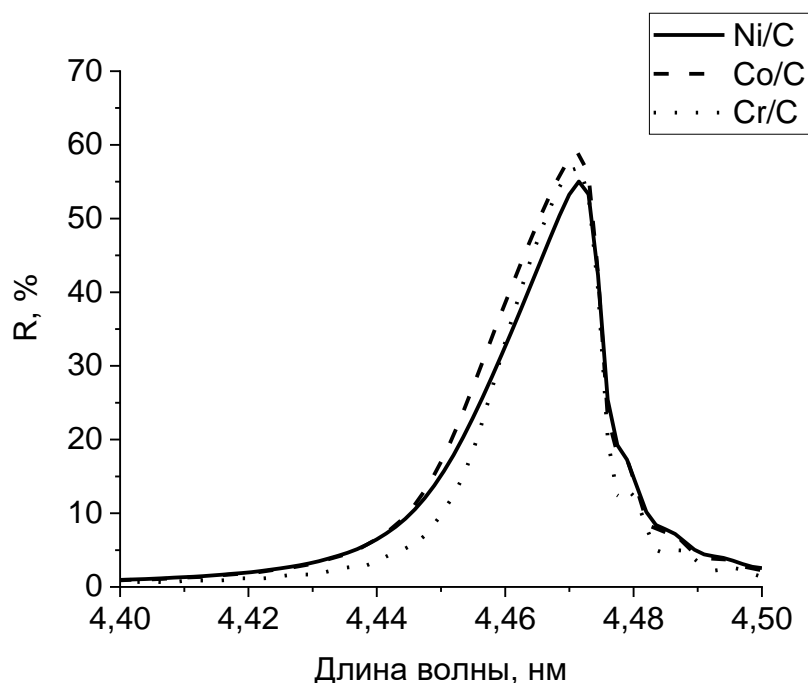


Рисунок 2.2 – Зависимости расчетного коэффициента отражения для идеальных структур с рабочими углами скольжения 90 градусов на основе материалов Ni/C (сплошная кривая), Co/C (пунктирная кривая) и Cr/C (точечная кривая).

Из представленных графиков видно, что теоретически более высокое отражение имеют структуры на основе Cr/C и Co/C: $R = 56,8 \%$ и $R = 58,9 \%$ соответственно. Таким образом именно указанные выше пары материалов стоит считать перспективными для создания на их основе многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на работу в спектральном диапазоне 4,4 – 6,6 нм. Достоинством Cr/C зеркал является отсутствие магнитных свойств у Cr, что существенно упрощает их изготовление методом магнетронного напыления (с учетом наличия у магнетронных источников магнитных полей).

Стоит отметить, что ранее уже изучались многослойные рентгеновские зеркала на основе пар материалов Cr/C различными исследовательскими группами. Так, в работе [38] были синтезированы структуры с периодом $d = 11,64$ нм. Число

периодов при этом составляло величину $N = 20$. В рамках представленных в статье исследований было установлено, что при увеличении параметра β , который определяется как отношение толщины сильнопоглощающего материала в периоде к величине периода (в данном случае $\beta = d_{Cr}/d$, где d_{Cr} – толщина слоев хрома, d – период многослойной структуры), наблюдается рост шероховатостей от 0,32 до 0,49 нм. Измерения образцов при этом проводилось в области жесткого рентгеновского излучения с энергией 8,04 кэВ. Также в работе показано, что синтезированные структуры обладают нулевым значением внутренних напряжений при значении $\beta = 0,45$. Для структуры с $\beta = 0,37$ был измерен коэффициент отражения, который равнялся $R = 26,6\%$ при энергии излучения 1,04 кэВ. Величина внутренних напряжений такой структуры при этом составляла величину 261,72 МПа.

В работе [39] были получены значения коэффициента отражения для многослойных рентгеновских зеркал на основе пар материалов Cr/C $R = 7,5\%$ при угле скольжения 85 градусов и $R = 13,61\%$ для s-поляризованного излучения при угле скольжения 44 градуса.

В работе [40] были синтезированы Cr/C многослойные рентгеновские зеркала со значением периода $d = 3,86$ нм, $\beta = 0,6$, $N = 100$. Коэффициент отражения составил величину $R = 21,8\%$ для s-поляризованного излучения с энергией 250 эВ (длина волны – 4,96 нм) при угле скольжения 40,7 градусов. Шероховатости слоев хрома и углерода имели значения: 0,4 и 0,32 нм соответственно.

В работе [41] были синтезированы Cr/C многослойные структуры с периодом $d = 9$ нм, $\beta = 0,33$ и числом периодов $N = 10$. На длине волны 4,48 нм был получен коэффициент отражения $R = 23\%$ при угле скольжения 14 градусов. Значения шероховатостей для слоев хрома и углерода равнялись 0,42 нм и 0,26 нм соответственно.

В работе [42] были синтезированы Cr/C зеркала с периодами $d = 3,25$ нм, $\beta = 0,4$ и числом периодов $N = 150$. В работе был получен коэффициент отражения $R = 18,9\%$ на длине волны 6,42 нм и угле скольжения 88° . Значения межслоевых шероховатостей при этом составили 0,35 нм.

В работе [43] было получено значение коэффициента отражения $R = 7\%$ для Cr/C многослойных рентгеновских зеркал с величиной периода $d = 2,5$ нм и числом периодов $N = 110$ на длине волны 5 нм. Угол скольжения излучения при этом равнялся 78 градусов. Восстановленные значения шероховатостей составили величину 0,35 нм.

Исходя из приведенных выше результатов можно сделать вывод о наличии в Cr/C зеркалах протяженных межслоевых границ, которые приводят к тому, что измеренный экспериментально коэффициент отражения оказывается ниже теоретического предела.

В работе [44] были синтезированы МРЗ Cr/C со значением периода $d = 11,51$ нм, $\beta = 0,37$ и соответствующими толщинами слоев $d_{Cr} = 3,25$ нм и $d_C = 6,16$ нм. Величины переходных областей (межслоевых интерфейсов) при этом составили 1,3 нм для границы Cr-на-C и 0,8 нм для границы C-на-Cr. Синтезированные структуры облучали синхротронным излучением, а также нагревали до фиксированных температур. Облучение синхротронным излучением с плотностью мощности 0,1 Вт/мм² и энергией 1183,6 эВ в течение 18 часов привело к загрязнению поверхности: в месте, куда падал пучок, появилось пятно. При этом измерения отражательных характеристик в жестком рентгеновском диапазоне длин волн (энергия излучения $E = 8,04$ кэВ) не показали разницы для области, куда падал пучок, и вне ее. Измерение коэффициента отражения для излучения с энергией 1183,6 эВ показало, что в облученной области коэффициент отражения был порядка 20%, а вне пятна порядка 26%. Также проводились измерения отражательных характеристик зеркал при энергиях падающего излучения 1120 эВ до 1400 эВ при угле скольжения 87 градусов и при энергиях от 900 до 1250 эВ при угле 86,4 градуса. Коэффициент отражения при отжиге возрос с $R = 27,9\%$ в первом случае и с $R = 21,6\%$ во втором случае на несколько процентов. После отжига при температуре 200 градусов значения коэффициента отражения равнялись $R = 31,7\%$ и $R = 25,6\%$ соответственно. При дальнейшем нагреве наблюдалось снижение коэффициента отражения. При отжиге при температуре 700 градусов значения коэффициента отражения были равны $R = 29,2\%$ и $R = 22,4\%$, однако это даже больше, чем было изначально. Данный эффект объясняется ростом плотности хрома и уменьшением

плотности углерода. Таким образом, в данной работе продемонстрировано, что Cr/C зеркала обладают отличной температурной стабильностью и могут быть использованы в монохроматорах синхротронного излучения.

На данный момент, самый высокий полученный экспериментально коэффициент отражения для Cr/C МРЗ нормального (или около нормального) падения в окрестности края поглощения углерода был опубликован в статье [45] и равнялся $R = 15,4\%$ при угле скольжения излучения $81,62$ градусов. Измерения проводились на длине волны $4,47$ нм. Данное значение существенно ниже теоретического предела. Следовательно, актуальной задачей является улучшение отражательных характеристик Cr/C зеркал. При этом в литературе отсутствует информация о применении методик интерфейс-инжиниринга для улучшения границ многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C, что позволило бы увеличить их экспериментальный коэффициент отражения.

2.2. Синтез и изучение свойств МРЗ Cr/C

Многослойные рентгеновские зеркала Cr/C синтезировались методом магнетронного распыления, описанным в главе 1. Параметры магнетронного разряда имели следующие значения $I_{Cr} = 360$ мА, $U_{Cr} = 303$ В, $I_C = 800$ мА, $U_C = 302$ В. До начала синтеза проводилась откачка остаточных газов из вакуумного объема до значения давления на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. В качестве рабочего газа был использован высокочистый (99,998%) аргон. Давление рабочего газа в процессе синтеза находилось на уровне $1,3 \cdot 10^{-3}$ Торр. Нанесение отражающего покрытия осуществлялось на кремниевые подложки со среднеквадратичным значением шероховатости на уровне 0,2 нм. Подробнее методика синтеза описана в параграфе 1.2.

Восстановление структурных параметров синтезированных образцов проводилось с помощью программного обеспечения Multifitting путем подгонки экспериментальных кривых отражения, измеренных на разных длинах волн. Пример такой подгонки для Cr/C зеркала RS-742 приведен на рисунке 2.3. Параметры данного зеркала: период $d = 8,7$ нм, $\beta = 0,4$, величина интерфейса C-на-Cr $S_{Cr} = 0,3$ нм, величина интерфейса Cr-на-C $S_C = 0,36$ нм, значение пикового коэффициента отражения на рабочей длине волны $\lambda = 4,47$ нм $R = 36,2$ %.

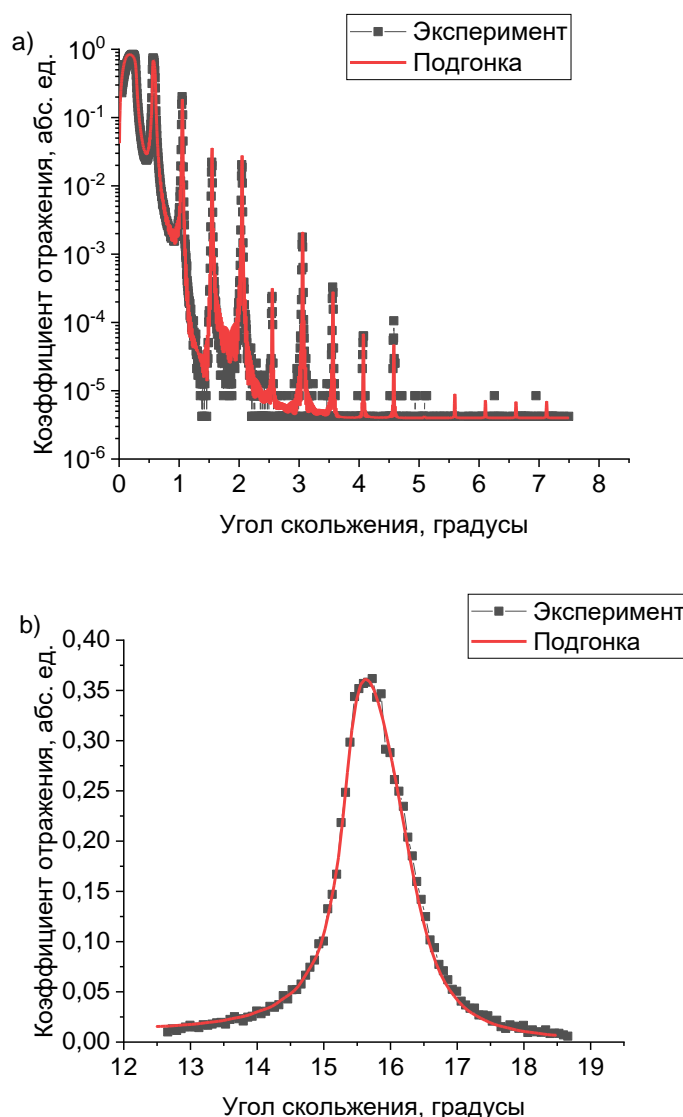


Рисунок 2.3 – Экспериментальные измерения (черные кривые с точками) и их подгонка (красные кривые). Рисунки а и б соответствуют зависимостям коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длинах волн $\lambda = 0,154$ нм и $\lambda = 4,47$ нм соответственно.

На первом этапе исследований был синтезирован ряд Cr/C структур с разными значениями периода: от $d = 2,28$ нм до $d = 8,7$ нм, что соответствует широкому диапазону рабочих углов зеркала на длине волны $\lambda = 4,47$ нм (от близких к нормали до скользящего падения). Структурные параметры синтезированных образцов приведены в таблице 2.1. На рисунке 2.4 приведена зависимость переходных областей Cr-на-C и C-на-Cr от периода структуры на длине волны $\lambda = 4,47$ нм. На рисунке 2.5 приведена аналогичная зависимость для коэффициента отражения Cr/C зеркал с оптимальным значением числа периодов.

Таблица 2.1 – Структурные параметры зеркал Cr/C. d – период зеркала в нм, θ – рабочий угол скольжения в градусах на длине волны 4,47 нм, S_c – величина переходной области Cr-на-C, S_{Cr} – величина переходной области C-на-Cr, R_{max} – коэффициент отражения.

d , нм	θ , °	S_c , нм	S_{Cr} , нм	R_{max} , %
2,278	81,3	0,51	0,37	15,0
2,393	70,0	0,51	0,36	15,2
2,533	62,5	0,39	0,35	17,3
2,973	49,4	0,40	0,27	15,8
3,487	40,4	0,42	0,25	17,6
5,280	24,5	0,33	0,30	25,1
6,905	19,5	0,36	0,33	32,6
8,750	15,5	0,36	0,30	36,7

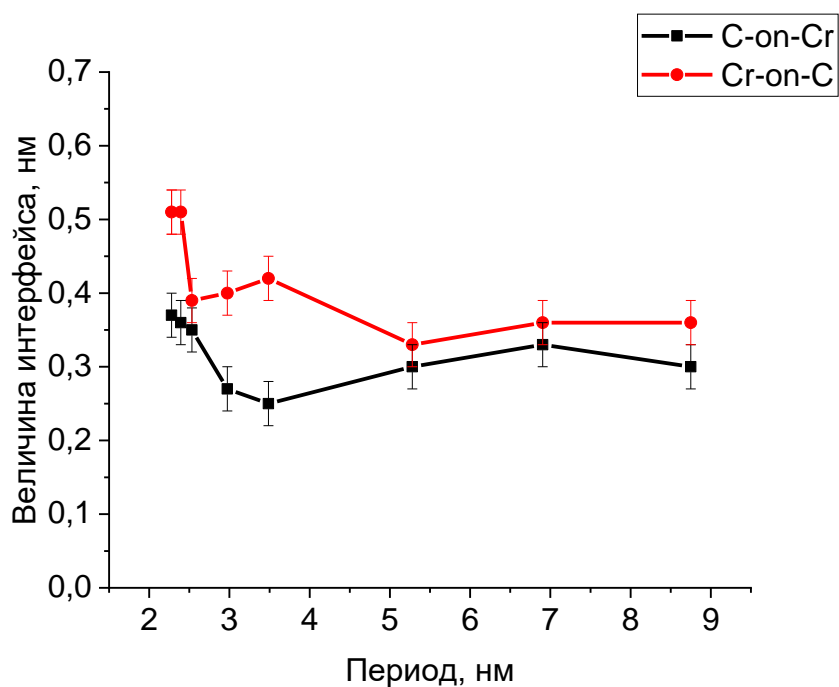


Рисунок 2.4 – Зависимость величины переходных областей для Cr/C зеркал от периода.

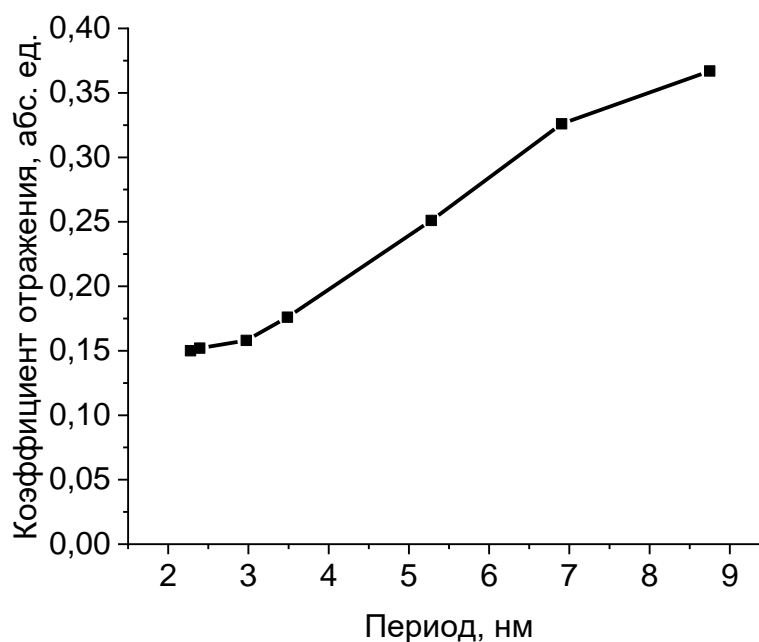


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента отражения для Cr/C зеркал от периода структуры.

Из полученных данных можно сделать несколько выводов. Во-первых, величина межслоевых интерфейсов возрастает при значениях периода меньше $d = 2,533$ нм. При больших периодах величина переходных областей слабо зависит от величины периода. Во-вторых, переходная область Cr-на-C является более протяженной, чем C-на-Cr для любого периода. В-третьих, результат для зеркал нормального падения повторил предыдущий экспериментальный рекорд. В-четвертых, коэффициент отражения зеркала начинает расти при увеличении периода и имеет наибольшие значения для структур, оптимизированных на работу под скользкими углами. Этот факт имеет интересное следствие для практических приложений. В случае, когда зеркала применяются в приборах, нацеленных на получение изображений с максимальным разрешением (микроскопы, телескопы), как правило, используется оптическая схема с зеркалами нормального падения. Однако в случае, когда можно пожертвовать пространственным разрешением для получения максимального коэффициента отражения в системе (спектрометрия), имеет смысл проектировать оптическую схему, оптимизированную на работу под скользкими углами. Также стоит отметить, что наличие протяженных границ

приводит к тому, что экспериментальные коэффициенты отражения существенно ниже своих теоретических пределов.

2.3 Методики интерфейс-инжиниринга межслоевых границ Cr/C зеркал

Для снижения влияния негативного эффекта от перемешивания материалов на границах многослойного зеркала на коэффициент отражения в реальных структурах применяют методики интерфейс-инжиниринга. Среди данных методик можно выделить основные, наиболее часто применяемых для улучшения отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал. Во-первых, распространенным методом интерфейс-инжиниринга является пассивация слоев азотом. Данный метод заключается в следующем. Слои в структуре синтезируются в чистом аргоне. При этом после того, как слой материала был нанесен, в рабочий вакуумный объем напускается азот. В результате этого на границе слоя образуются соединения распыляемого материала с азотом, что препятствует взаимодействию материалов структуры между собой, а также диффузии атомов из одного слоя в другой, что, в свою очередь, способствует уменьшению переходной области. Выбор азота в качестве газа для пассивации обусловлен малым поглощением в выбранном спектральном диапазоне, а также его химической активностью, так как инертные газы не могут образовывать химические соединения на границе. Напуск азота прекращается до того, как начинается нанесение следующего слоя материала. Данный метод был успешно применен в ряде работ [46, 47]. В частности, в [47] для многослойных структур на основе пары материалов Cr/Sc пассивация слоев хрома позволила получить рекордные значения коэффициента отражения $R = 23,8\%$ на длине волны 3,14 нм.

Другим хорошо развитым методом интерфейс-инжиниринга, связанным с применением азота, является, так называемое, реактивное распыление (нитридизация), которое заключается в синтезе многослойной структуры в смеси газов «аргон + азот». Применение данного метода для структур вида LaN/B, оптимизированных на работу в окрестности длины волны 6,7 нм, позволило получить рекордный для данной спектральной области коэффициент отражения $R = 64,1\%$ при угле падения 1,5 градуса от нормали на длине волны 6,65 нм [48] в силу того, что добавление азота препятствовало образованию боридов лантана на границе.

В данной главе проводятся результаты исследования влияния методик интерфейс-инжиниринга на рентгенооптические свойства Cr/C зеркал. На первом этапе экспериментов было проведено исследование отражательных характеристик и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал Cr/C, синтезированных в смеси газов «аргон + азот». Период структур составлял $d = 2,55$ нм, величина параметра $\beta = 0,51$, число периодов составляло $N = 80$. Зависимости коэффициента отражения, величины переходных интерфейсов, а также профили электронной плотности от доли азота в смеси газов для Cr/C зеркал представлены на рисунке 2.6, рисунке 2.7, рисунке 2.8 соответственно.

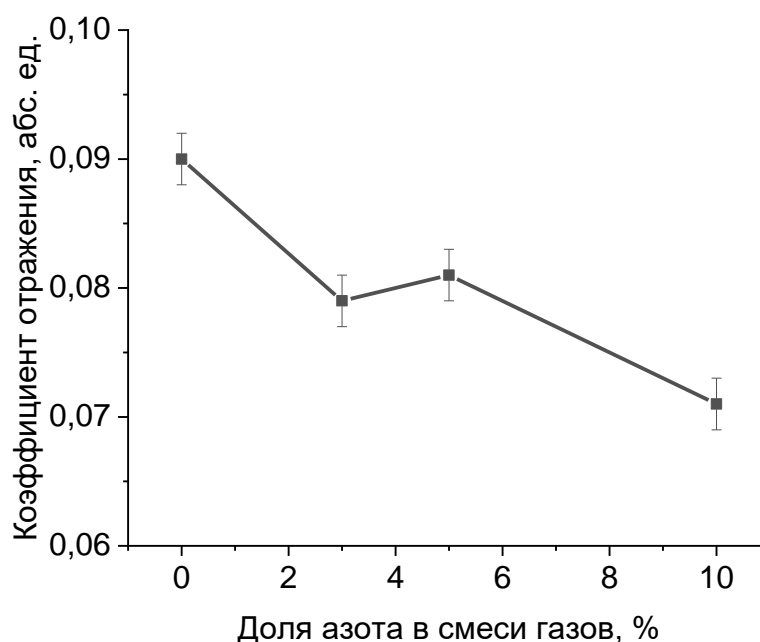


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента отражения Cr/C зеркал от парциального давления азота в смеси газов «аргон + азот».

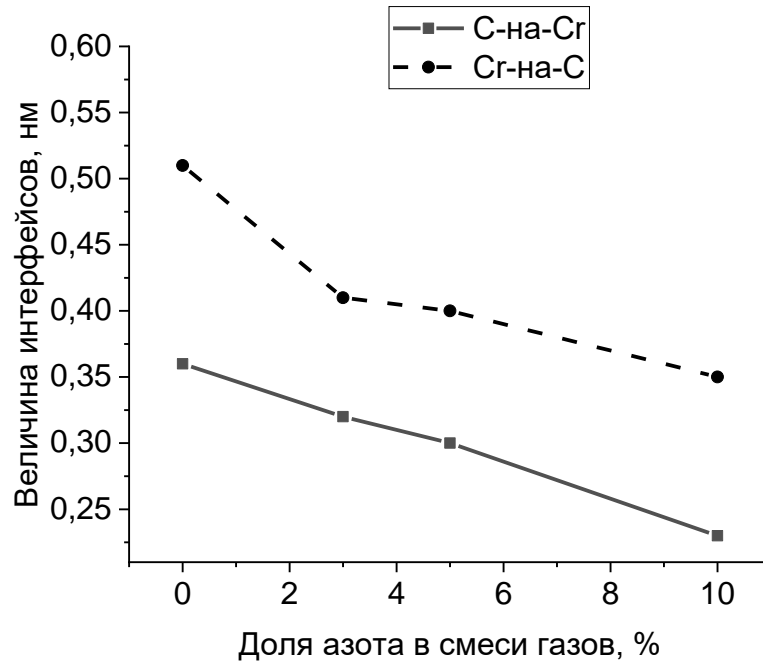


Рисунок 2.7 – Зависимость величины переходных областей хрома и углерода от парциального давления азота в смеси газов «аргон + азот». Сплошная кривая соответствует хрому, пунктирная – углероду.

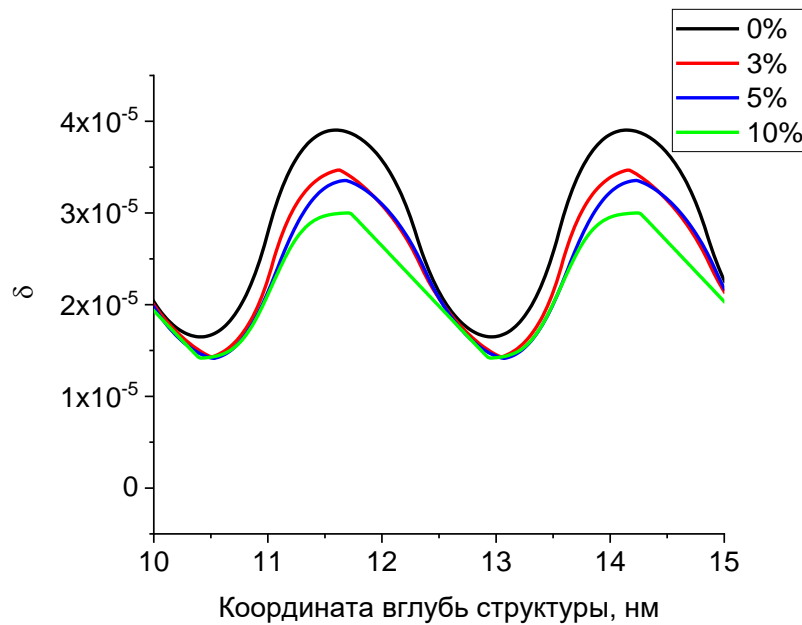


Рисунок 2.8 – Профили электронной плотности Cr/C зеркал для различных долей азота в смеси газов.

Из представленных зависимостей видно, что увеличение доли азота в смеси газов приводит к падению коэффициента отражения. Это обусловлено тем фактом,

что несмотря на улучшение межслоевых границ, плотность слоев хрома начинает падать с ростом парциального давления азота, в то время как плотность слоев углерода не меняется, в результате чего оптический контраст между слоями ухудшается. Этот эффект является доминирующим, в результате можно сделать вывод, что синтез зеркал Cr/C в смеси газов в данном случае не является оптимальным способом интерфейс-инжиниринга.

Далее был проведен ряд экспериментов, направленных на изучение влияния пассивации азотом границ на характеристики многослойных зеркал Cr/C. На рисунке 2.9 представлены результаты измерения коэффициентов отражения от угла скольжения излучения с длиной волны 4,47 нм для структур Cr/C, синтезированных в чистом аргоне без пассивации слоев, а также для структур вида Cr/C_{pass}, Cr_{pass}/C и Cr_{pass}/C_{pass}, где индекс “pass” означает пассивацию соответствующего слоя. Для данных структур число периодов составляло N = 200, величина периода d = 2,39 нм, доля хрома периоде β = 0,44. В таблице 2.2 приведены восстановленные структурные параметры для синтезированных зеркал.

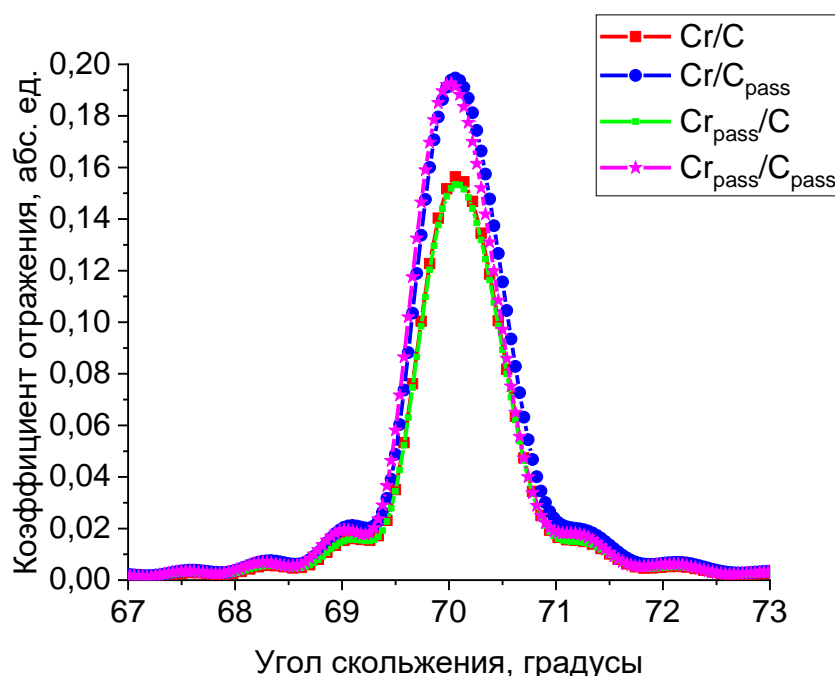


Рисунок 2.9 – Зависимости экспериментально измеренного коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 4,47$ нм для структур Cr/C (сплошная красная кривая), Cr/C_{pass} (синяя кривая с кругами), Cr_{pass}/C (зеленая кривая с квадратами) и Cr_{pass}/C_{pass} (фиолетовая кривая со звездами).

Таблица 2.2 – Структурные параметры и отражательные характеристики синтезированных образцов.

Структура	С-на-Сг интерфейс, нм	Сг-на-С интерфейс, нм	R%
Cr/C	0,36	0,51	15,6
Cr/C _{pass}	0,35	0,39	19,5
Cr _{pass} /C	0,36	0,52	15,3
Cr _{pass} /C _{pass}	0,36	0,41	19,3

Из представленных выше данных видно, что пассивация слоев углерода привела к существенному уменьшению величины переходной области на границе Сг-на-С с 0,51 нм до 0,39 нм. Измеренный коэффициент отражения для Cr/C_{pass} структуры составил R = 19,5%. Пассивация слоев хрома не привела к уменьшению переходной области на границе С-на-Сг. Значение коэффициента отражения для структуры с пассивацией обеих границ совпадает с тем, что было получено для структуры вида Cr/C_{pass}, что подтверждает тезис о том, что пассивация слоев углерода положительно влияет на отражательные характеристики зеркала, в то время как пассивация слоев хрома не приводит к аналогичному результату. Учитывая вышесказанное, было синтезировано зеркало нормального падения вида Cr/C_{pass} с величиной периода $d = 2,246$ нм и числом периодов $N = 200$. На рисунке 2.10 приведена измеренная зависимость коэффициента отражения данной структуры от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 4,47$ нм.

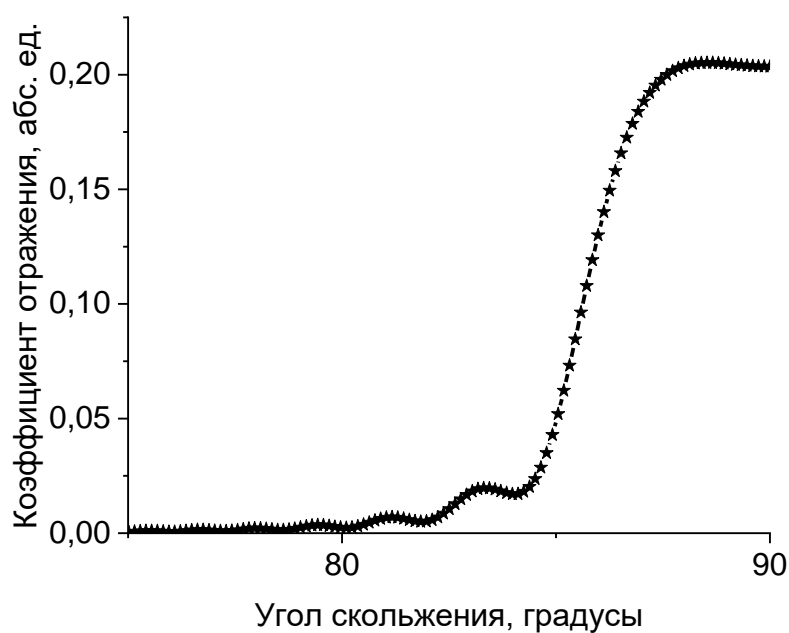


Рисунок 2.10 – Зависимости коэффициента отражения структуры нормального падения вида Cr/C_{pass} на длине волны $\lambda = 4,47$ нм.

Пиковый коэффициент отражения данной структуры составил $R = 20,2\%$. Данное значение является рекордным для структур нормального падения, оптимизированных на работу в окрестности края поглощения углерода. Полученный результат открывает широкие перспективы по использованию многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Cr/C в оптических схемах микроскопов, оптимизированных на работу в «окне прозрачности углерода».

2.4 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 6,6-9 нм

Как уже было отмечено в предыдущей главе, одним из важных практических приложений многослойных рентгеновских зеркал является проекционная литография. На данный момент – это основной метод литографии при производстве микросхем с минимальными размерами топологических элементов от 16 нм и ниже, а, следовательно, его развитие представляет собой актуальную задачу. Важными характеристиками литографа являются пространственное разрешение и производительность. Для повышения пространственного разрешения литографической системы необходимо осуществлять переход к более коротким рабочим длинам волн.

Производительность системы, в свою очередь, зависит от мощности и спектральных характеристик источника излучения, а также отражательных свойств многослойных зеркал, из которых проектируется оптическая схема литографа. Для 10-зеркальной рентгенооптической схемы литографа мощность излучения, падающая на засвечиваемый образец, может быть определена через выражение [12]:

$$P_w \sim \int_0^{\infty} S(\lambda) R^{10}(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

где P_w – мощность излучения, падающего на образец, $S(\lambda)$ – спектральная плотность мощности источника, $R(\lambda)$ – зависимость коэффициента отражения от длины волны многослойных рентгеновских зеркал в оптической схеме литографа (степень 10 соответствует системе, состоящей из 10 зеркал). На практике для корректного сравнения эффективности различных источников и оптических систем, учитывая спектральную ширину полосы пропускания оптической системы, используется следующее соотношение:

$$E = R^{10} S(\lambda) \Delta\lambda = R^{10} CE, \quad (2.2)$$

где CE – коэффициент конверсии, характеризующий долю полной энергии, потребляемой источником (к примеру, энергии излучения лазера, падающего на мишень), которая излучается в полупространство в спектральную полосу пропускания оптической системы, λ – рабочая длина волны. Таким образом, CE зависит от свойств источника и пропускающей способности системы.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что выбор рабочей длины волны для литографии должен быть осуществлен исходя из двух факторов: наличия многослойных рентгеновских зеркал с высокими коэффициентами отражения на рабочей длине волны, а также наличия эффективных источников излучения.

Анализ свойств источников излучения и многослойных структур показывает, что перспективной длиной волны для литографии следующего поколения может быть длина волны в окрестности 6,7 нм. Во-первых, в данной спектральной области находится К-край поглощения бора ($\lambda_k \sim 6,63$ нм), что позволяет выбрать данный материал в качестве слабопоглощающего для синтеза на его основе многослойных рентгеновских зеркал. Во-вторых, источники на основе тербия и гадолиния [49, 50] могут обеспечить высокую эффективную мощность системы. В-третьих, в соответствии с формулой (3) переход к данной длине волны позволяет вдвое повысить разрешение по сравнению с активно развиваемой литографией с рабочей длиной волны 13,5 нм.

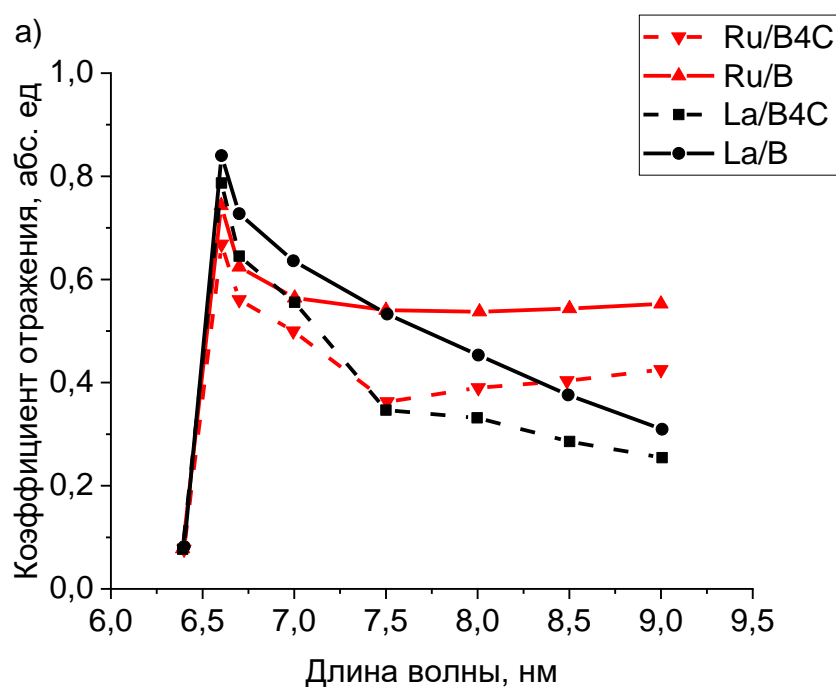
Другим важным практическим применением многослойных рентгеновских зеркал, оптимизированных на рабочую длину волны 6,7 нм, является рентгенофлуоресцентный анализ, представляющий собой неразрушающий метод изучения исследуемых объектов. Такой метод может применяться, например, для измерения концентрации примесей бора в алмазе [51] что является важной задачей для развития алмазной электроники. В рамках данного метода излучение из источника фокусируется на образец с помощью зеркала-монохроматора, позволяющего из спектра излучения выбрать рабочую длину волны. Далее, отраженное от первого зеркала монохроматическое излучение попадает на образец, что приводит к ионизации атомов. Часть вышедшего из образца флуоресцентного излучения захватывается вторым зеркалом-монохроматором и фокусируется на входной щели детектора. Анализ излучения, принятого детектором, позволяет сделать вывод об атомном составе исследуемого образца. Для эффективной работы прибора необходимо обеспечить максимально возможный коэффициент отражения многослойных зеркал в оптической схеме.

Еще одним практическим применением является разработка монохроматоров для станций синхротронного излучения, где в качестве оптических элементов,

обеспечивающих монохроматизацию пучка, активно используются многослойные рентгеновские зеркала [52]. В данном случае требуется обеспечить не только высокий коэффициент отражения, но и высокую степень монохроматизации излучения (обычно лучше, чем 1%), что приводит к необходимости синтеза структур с узкой полосой пропускания, как и в случае использования многослойных рентгеновских зеркал в задачах спектроскопии [53].

Для применения многослойных рентгеновских зеркал в качестве отражательных элементов в оптической схеме литографа, необходимо, чтобы они обеспечивали максимально возможный интегральный (то есть с учетом спектральной полосы пропускания) коэффициент отражения, так как от этого зависит время засветки фоторезиста, а, следовательно, время, затрачиваемое на производство микросхем. Для задач спектроскопии, напротив, требуется как можно более узкая спектральная ширина пика отражения.

На рисунке 2.11 представлены теоретические зависимости пикового значения коэффициента отражения (а) и спектральной полосы пропускания (б) для идеальных (то есть без шероховатостей и с табличными значениями плотностей материалов) многослойных рентгеновских зеркал на основе различных материалов в диапазоне от 6 до 9 нм, оптимизированных на максимальный коэффициент отражения.



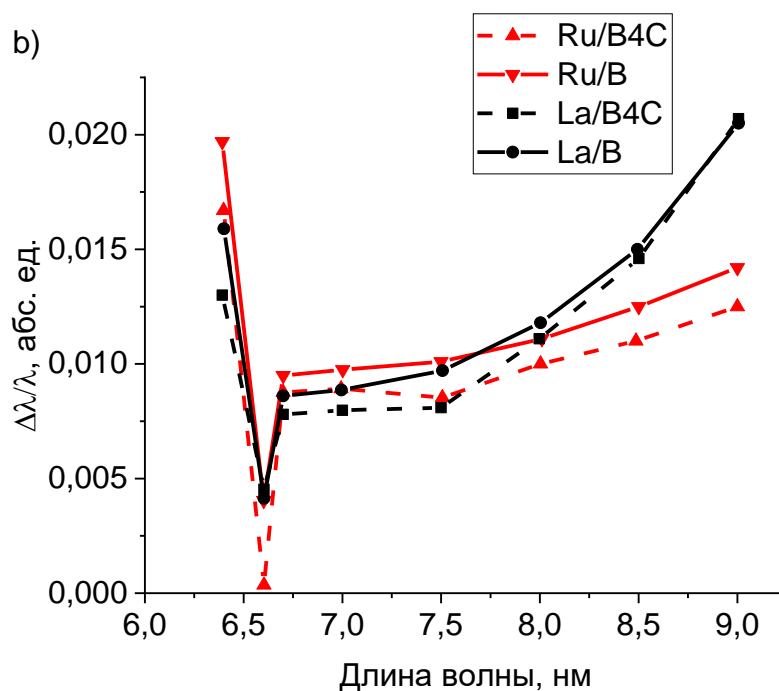


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента отражения (а) и спектральной селективности (b) для идеальных структур La/B (черная сплошная кривая), La/B₄C (черная пунктирная кривая), Ru/B (красная сплошная кривая), Ru/B₄C (красная пунктирная кривая) в диапазоне 6 – 9 нм при угле скольжения излучения 90 градусов.

Из представленных зависимостей видно, что наибольший коэффициент отражения 84% (в окрестности длины волны 6,7 нм) позволяют получить структуры на основе пары материалов лантана и бора. Замена бора на оптически близкий карбид бора снижает коэффициент отражения для всех рассматриваемых структур. Зеркала на основе Ru позволяют достичь более высоких коэффициентов отражения, чем структуры на основе La при рабочих длинах волн, больше 7,5 нм. Несмотря на то, что пиковый коэффициент отражения Ru/B МРЗ ниже, чем у La/B, тем не менее, спектральная полоса отражения, наоборот, на шире у Ru/B зеркал, что делает эти МРЗ конкурентоспособными хорошо изученным La/B для литографии. Таким образом, зеркала на основе Ru могут рассматриваться как перспективные для решения ряда практических задач.

Важно отметить, что известные на данный момент экспериментально полученные коэффициенты отражения для La/B и La/B₄C многослойных рентгеновских зеркал существенно уступают теоретическим. Одним из главных

факторов, определяющих отличие экспериментальных и теоретических результатов, является наличие протяженных границ между слоями в силу взаимной диффузии и химической активности материалов, а также наличие в структурах межслоевых шероховатостей. В работе [54] был получен коэффициент отражения $R = 40\%$ на длине волны 6,66 нм для La/V₄C многослойного зеркала с периодом $d = 3,35$ нм. Для улучшения межслоевых границ в данной работе была применена методика интерфейс-инжиниринга, заключающаяся в добавлении в структуру барьерных слоев. При нанесении прослоек углерода с толщиной 0,25 – 0,3 нм на более протяженную границу La-на-V₄C был получен коэффициент отражения 58,6% для La/V₄C/C структур на длине волны 6,66 нм при угле скольжения 69,1 градусов.

Другим методом уменьшения величины интерфейсов является нитридизация слоев La, что может быть осуществлено путем напуска газа N₂ во время синтеза структур. В статье [55] исследовались отражательные характеристики La/V₄C, LaN/V₄C и La/C/V₄C структур, оптимизированных на рабочую длину волны 6,7 нм. В ходе экспериментов были получены значения коэффициента отражения $R = 51,1\%$ при угле падения 10 градусов и периоде $d = 3,4$ нм, $R = 58,4\%$ при угле падения 45 градусов и периоде $d = 4,8$ нм для La/V₄C. Для LaN/V₄C: $R = 58,1\%$ при угле падения 10 градусов и периоде $d = 3,4$ нм, $R = 66,6\%$ при угле падения 45 градусов и периоде $d = 4,8$ нм. Из полученных результатов следует, что нитридизация слоев La позволила существенно увеличить коэффициент отражения. Добавление прослоек углерода на различные границы также позволило повысить отражательную способность структур. Коэффициент отражения составил $R = 59,4 \%$ для La/V₄C/C структуры и $R = 61,8 \%$ для La/C/V₄C структуры при угле падения 45 градусов. Для структуры La/C/V₄C также был получен коэффициент отражения $R = 56,8 \%$ при угле падения 10 градусов.

В работе [56] изучалось отражение La/V структур с различной величиной периода зеркала. В статье приведены следующие результаты (таблица 2.3):

Таблица 2.3 – d – период зеркала, АОI – угол падения излучения, R – коэффициент отражения

d , нм	АОI, градусы	R , %
3.49	1.5	4.5
4.36	37.3	18.5
5.35	49.5	42.1
7.32	61.3	66.5

При этом число периодов в структурах равнялось $N = 40$. Для структур La/N/V (в ходе эксперимента проводилась обработка слоев La ионами N_2) и LaN/V с числом периодов $N = 175$ были получены значения коэффициента отражения $R = 53\%$ и $R = 57,3\%$ соответственно.

В работе [46] изучалась временная стабильность структур на основе лантана. При хранении LaN/V многослойных зеркал наблюдалась деградация коэффициента отражения в силу окисления верхних слоев LaN, даже если применялся защитный слой V поверх структуры. При этом для структуры La/V, когда нитридизация слоев лантана не применялась, в течение года хранения на воздухе не было обнаружено деградации отражательных характеристик. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что стабильность структуры зависит от того, какой материал находится под защитным слоем. Для подтверждения данного вывода в работе был проведен следующий эксперимент. Были синтезированы отдельные пленки La и LaN с толщиной 30 нм, покрытые защитным слоем V. В случае, когда толщина защитного слоя составляла 1,5 нм, обе структуры окислились на воздухе. Изображения, полученные с оптического микроскопа, показали наличие на поверхности дефектов. При этом для толщины слоя бора 2 нм деградация была обнаружена только для V-на-LaN образца, в то время как для образца V-на-La дефектов на поверхности обнаружено не было. Однако, несмотря на отсутствие деградации La/V структур при контакте с атмосферой, они обладают худшим отражением, чем LaN/V структуры, в силу более протяженных интерфейсов.

В статье [57] изучалась термическая стабильность La/V₄C и LaN/V₄C многослойных зеркал с числом периодов $N = 250$ и величиной периода $d = 3,4$ нм.

Структуры были синтезированы методом магнетронного напыления. После синтеза структуры нагревались до температур порядка 800 градусов с шагом в 100 градусов в течение 10 часов. Зеркала La/V₄C имели периодическую структуру даже при температурах 800 градусов. При этом число и интенсивность брэгговских пиков постоянно падало с увеличением температуры отжига, что свидетельствует об увеличении ширины интерфейсов и падении оптического контраста. При отжиге до 300 градусов не было обнаружено существенного изменения периода. При температурах от 300 до 800 градусов наблюдалось уменьшение периода структуры. При 800 градусах период равнялся 3,34 нм. Сразу после синтеза структуры La/V₄C имели коэффициент отражения $R = 49,8 \%$, при отжиге до 400 градусов $R = 37,2 \%$, при отжиге до 800 градусов $R = 2,3 \%$ на длине волны 6,71 нм и угле падения 8 градусов. Авторы объясняют падение коэффициента отражения увеличением диффузии и формированием LaV₆ кристаллитов. Для структур LaN/V₄C даже при отжиге до 800 градусов наблюдалось 4 брэгговских пика. При этом период зеркала увеличился до 3,55 нм. Увеличение периода авторы связывают с формированием аморфных компонент VN. Коэффициент отражения LaN/V₄C структур до отжига составил $R = 57\%$, после отжига на 400 градусах $R = 50,2 \%$, при температуре 800 градусов $R = 12,6 \%$. Таким образом, LaN/V₄C структуры показали лучшую термическую стабильность, чем La/V₄C.

Лучшие результаты с точки зрения коэффициента отражения для зеркал на основе лантана были получены в работе [48]. В статье авторы приводят значение коэффициента отражения $R = 64,1\%$ для LaN/V структур при угле падения 1,5 градуса от нормали и длине волны 6,65 нм. Добавление азота в структуру препятствовало образованию боридов лантана на границах, в результате чего было получено рекордное значение коэффициента отражения. Измерения зеркал проводились на синхротроне BESSY-II.

Стоит отметить, что на данный момент приведенное выше значение коэффициента отражения является рекордным, среди полученных экспериментально. При этом оно существенно уступает предельному теоретически возможному $R_{th} = 80\%$. Можно отметить, что в литературе отсутствуют данные об отражательной способности зеркал La/V и La/V₄C в диапазоне длин волн $\lambda > 6,7$ нм.

Менее изученными являются структуры на основе Ru. Имеется относительно небольшое количество работ о структурах Ru/V₄C, и полностью отсутствует информация о Ru/V. При этом даже для Ru/V₄C нет данных об отражательной способности в рассматриваемом спектральном диапазоне.

В работе [58] было исследовано влияние отжига на Ru/V₄C и Ru/C структуры с периодами $d = 3,5$ нм. Показано, что отжиг при температуре 600 градусов в течение часа привел к увеличению шероховатостей Ru/C структур, в то время как шероховатости Ru/V₄C структур практически не изменились.

В работе [59] исследуется влияние отжига при температуре 200 градусов на внутренние напряжения Ru/V₄C структур. Показано, что увеличение времени отжига приводит к снижению величины внутренних напряжений при любой доле рутения в периоде структуры.

В работе [60] исследовалось влияние отжига на Ru/V₄C структуры с периодами $d = 3,9$ нм. Измерение угловой зависимости коэффициента отражения при энергии излучения 20 кэВ показало отсутствие снижения коэффициента отражения в первом брэгговском пике после отжига структуры при температуре 550 градусов.

В работе [61] изучались Ru/V₄C структуры, синтезированные в смеси аргона и азота. Показано, добавление азота позволяет существенно снизить внутренние напряжения в структуре и увеличить коэффициент отражения. Так, структуры, синтезированные при парциальном давлении азота 15%, имели практически нулевое значение внутренних напряжений (-28 МПа), а также существенно более высокий коэффициент отражения – 67% при энергии излучения 8,04 кэВ, в то время как структуры, синтезированные в чистом аргоне – 54%.

Стоит отметить, что в указанных выше работах Ru/V₄C структуры изучались в области жесткого рентгеновского излучения. Следовательно, актуальными являются исследования многослойных зеркал на основе рутения в области мягкого рентгеновского диапазона длин волн.

2.5 Синтез и изучение свойств МРЗ Ru/B₄C

Синтез структур проходит в вакуумной камере при давлении остаточных газов 10^{-7} торр. При этом давление рабочего газа (аргон) составляло $1.3 \cdot 10^{-3}$ торр. Синтез слоев рутения и карбида бора осуществлялся методом магнетронного распыления при постоянном токе 300 мА и 1200 мА соответственно. Распыление мишени бора осуществлялось сфокусированным ионным пучком с током 78 мА и энергией пучка 803 эВ.

Первым этапом исследований многослойных структур Ru/B₄C являлся теоретический расчет зависимости коэффициента отражения от параметра β , который определяется как отношение толщины сильнопоглощающего материала в периоде к величине периода. В данном случае $\beta = d_{\text{Ru}}/d$, где d_{Ru} – толщина рутения в периоде структуры, d – период многослойного зеркала. Расчет проводился для идеальных структур с нулевыми межслоевыми шероховатостями, отсутствием дрейфа величины периода и табличными значениями плотностей материалов. Число периодов в данном расчете было выбрано $N = 200$. Увеличение числа слоев не приводит к росту коэффициента отражения в силу поглощения падающего излучения структурой. Данный расчет зависимости $R(\beta)$ представлен на рисунке 2.12. Период структур $d = 3,37$ нм, что соответствует случаю нормального падения излучения на длине волны 6,7 нм. Соответственно, величина отражения на рисунке 2.12 приведена для этой длины волны.

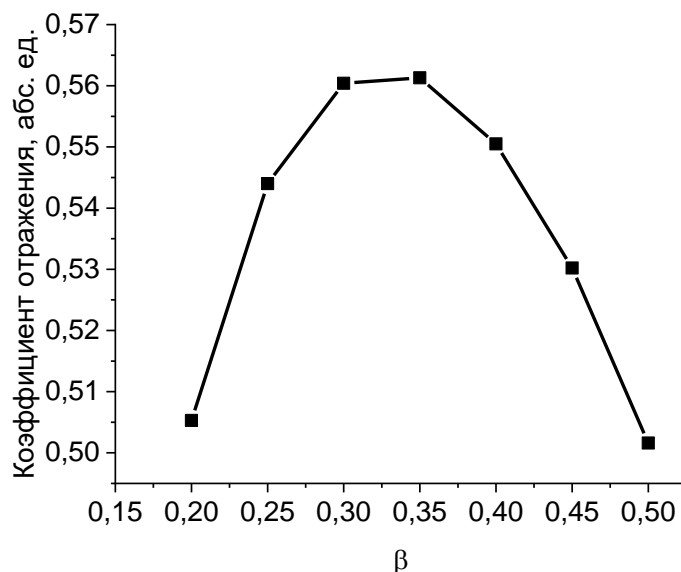


Рисунок 2.12 – Теоретическая зависимость коэффициента отражения для идеального МРЗ Ru/B₄C от параметра $\beta = d_{Ru}/d$ на длине волны 6,7 нм.

Из представленной зависимости можно сделать вывод, что максимальный теоретически возможный коэффициент отражения составляет $R = 56\%$ и достигается при значениях $\beta = 0,3 - 0,35$. При уменьшении или увеличении данного параметра относительно оптимального значения, коэффициент отражения начинает падать. При этом, стоит также отметить, что в диапазоне $\beta = 0,25 - 0,4$ падение коэффициента отражения не является существенным и составляет величину порядка 2%.

Следующим этапом исследований являлся синтез многослойных структур Ru/B₄C и исследование их структурных параметров. В работе изучался набор МРЗ Ru/B₄C с периодами около 3,445-3,545 нм и различными значениями β . Их структурные параметры приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Структурные параметры изученных образцов. S_Ru и S_B₄C – ширины переходных слоев на границах B₄C-на-Ru и Ru-на-B₄C соответственно.

Период, нм	β	S_Ru, нм	S_B ₄ C, нм
3,445	0,6	0,19	0,19
3,455	0,45	0,23	0,23
3,545	0,33	0,22	0,2

Приведенные в таблице 2.4 параметры получены подгонкой кривых отражения, снятых на длине волны $\lambda = 0,154$ нм на четырехкристальном дифрактометре Panalitical X'Pert PRO и на длинах волн $\lambda = 0,989$ нм и $\lambda = 1,759$ нм на лабораторном рефлектометре, оснащенный монохроматором РСМ-500. На рисунке 2.13 представлен пример такой подгонки для образца с $\beta = 0,45$. Здесь приведены экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла скольжения излучения для длин волн $\lambda = 0,154$ нм, $\lambda = 0,989$ нм и $\lambda = 1,759$ нм, а также подгонка экспериментальных данных.

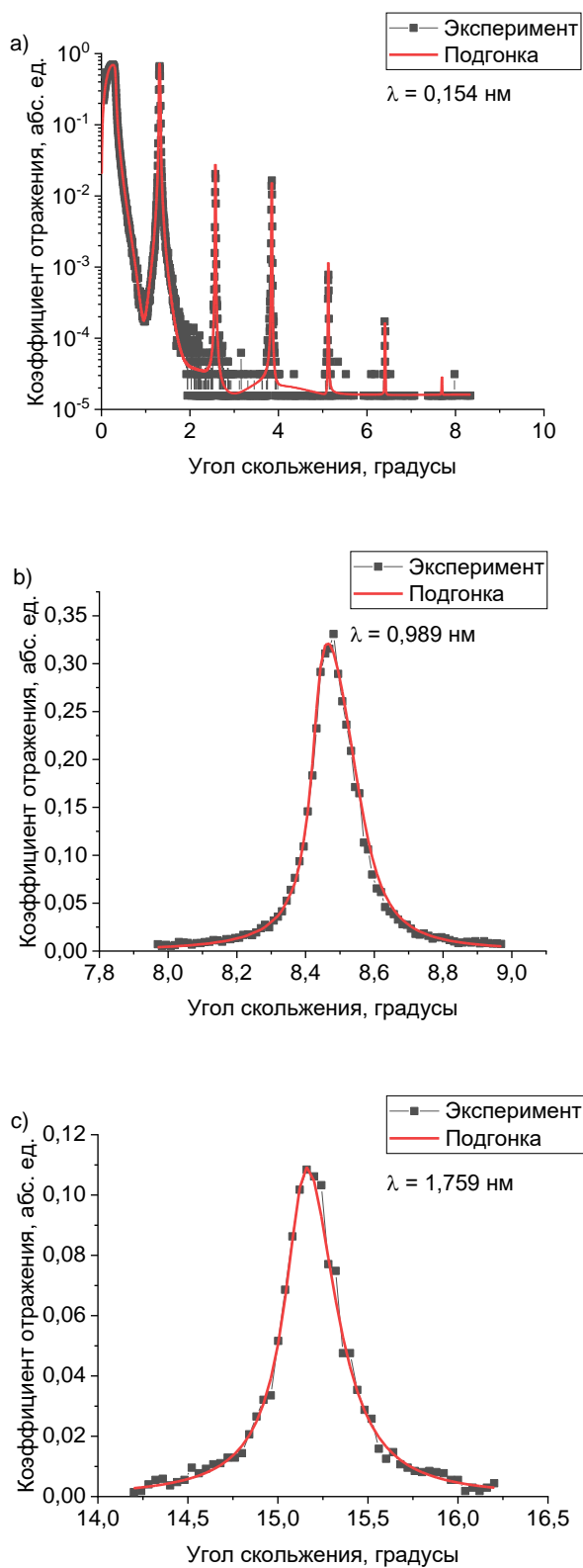
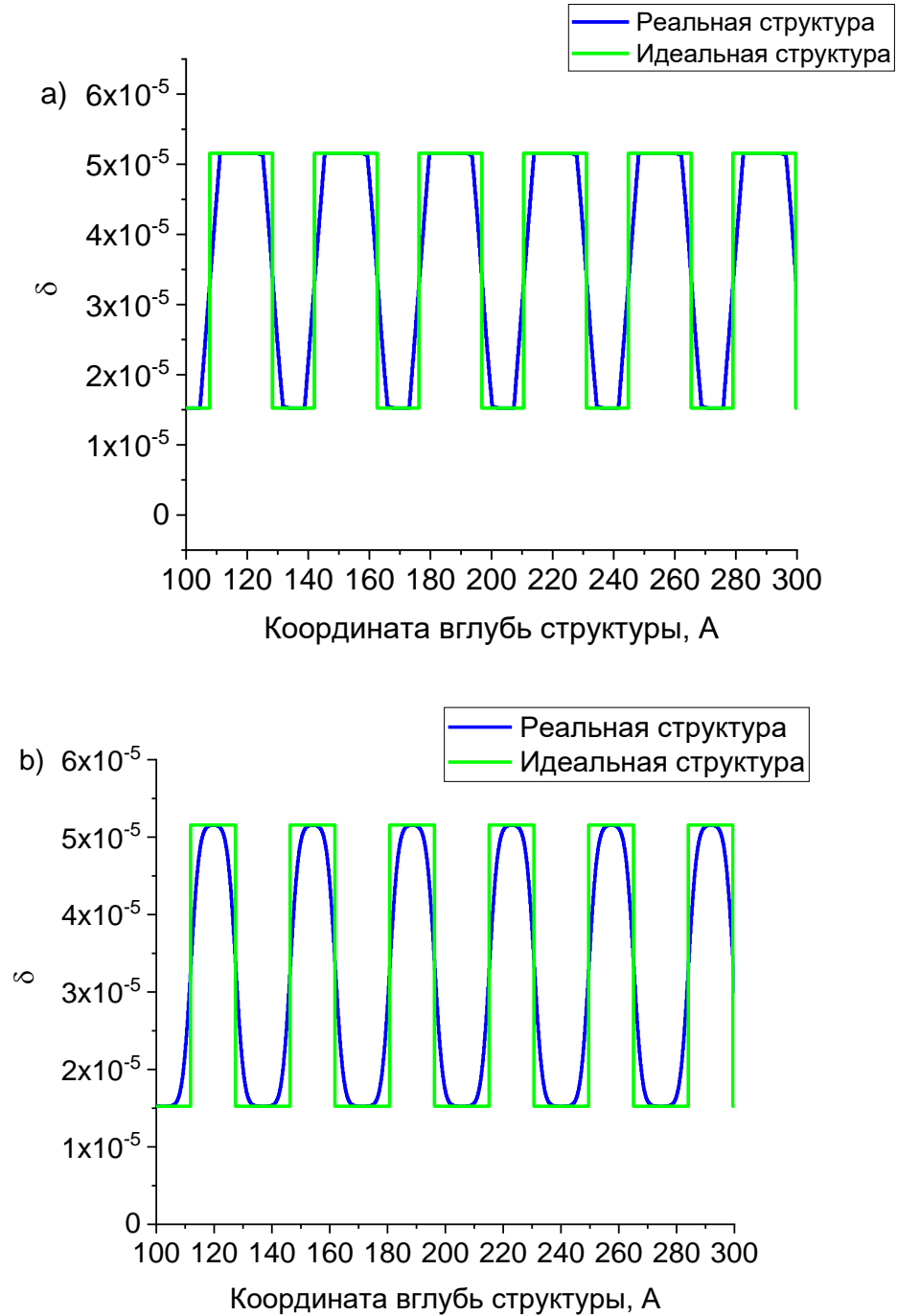


Рисунок 2.13 – Экспериментально измеренные зависимости коэффициента отражения (черные кривые) от угла скольжения излучения и их подгонка (красные кривые) для длин волн $\lambda = 0,154$ нм (а), $\lambda = 0,989$ нм (б) и $\lambda = 1,759$ нм (с).

На рисунке 2.14 представлены восстановленные профили действительной части добавки к диэлектрической проницаемости δ (где $\varepsilon = 1 - \delta + i\gamma$, ε – диэлектрическая проницаемость) для образцов с $\beta = 0,6$ (а), $0,45$ (b) и $0,3$ (c).



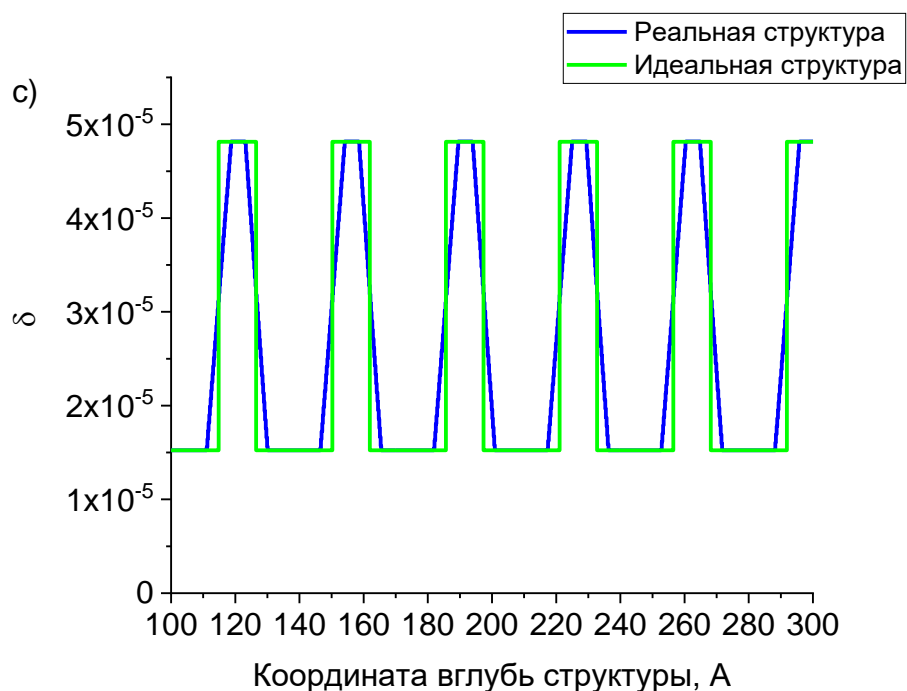


Рисунок 2.14 – Профили действительной части добавки к диэлектрической проницаемости для реальной структуры с учетом межслоевых интерфейсов (синяя кривая) и для идеальной структуры с нулевой шириной переходных областей (зеленая кривая).

Подгонка экспериментальных данных позволила установить, что значения переходных областей составляют значения порядка 0,2 нм для обеих границ. Определенные при подгонке значения ширины переходных слоев являются достаточно низкими, что исключает необходимость применения методик интерфейс-инжиниринга, в отличие от $\text{La}/\text{V}_4\text{C}$ структур. После этого была синтезирована структура $\text{Ru}/\text{V}_4\text{C}$ с периодом $d = 5,14$ нм. Анализ кривых зеркального отражения, измеренных на длинах волн $\lambda = 0,154$ нм и $\lambda = 9,34$ нм, показал, что зеркало также обладает низкими значениями переходных областей на уровне 0,2 нм для обеих границ, что позволило получить значение коэффициента отражения $R = 30\%$, близкое к теоретическому пределу $R_{th} = 38\%$ на длине волны $\lambda = 9,34$ нм для данного периода. На рисунке 2.15 приведено сравнение экспериментально полученных коэффициентов отражения и их подгонка.

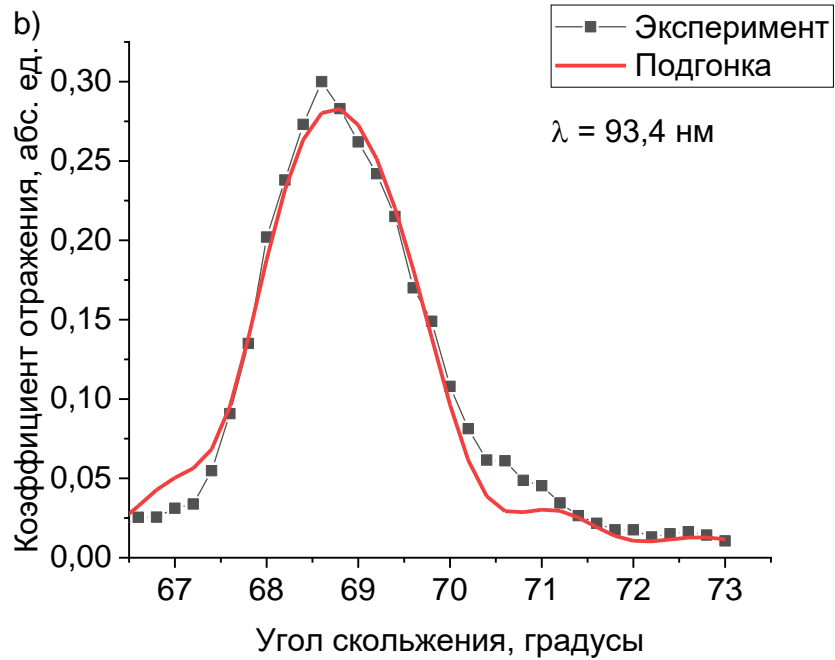
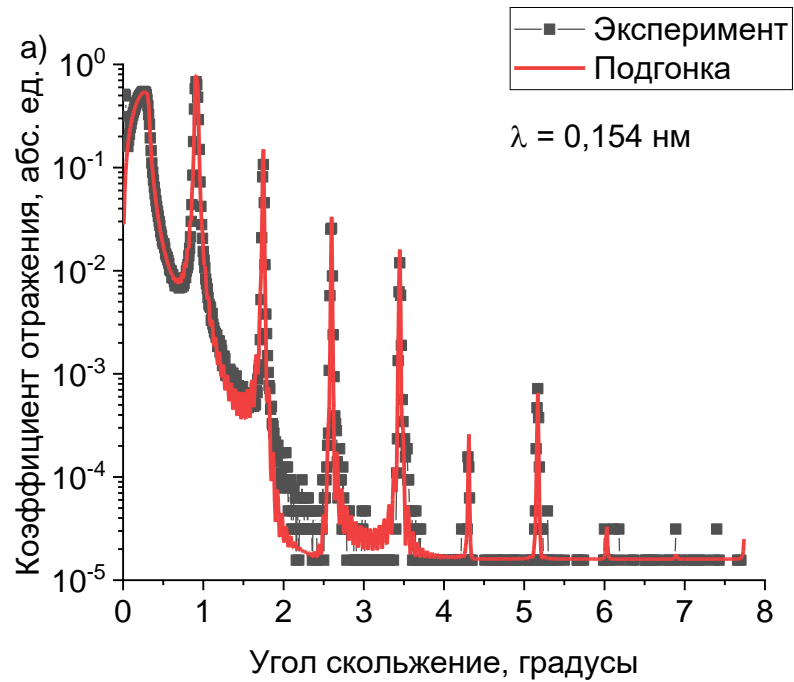


Рисунок 2.15 – Экспериментально измеренные (черные кривые) зависимости коэффициента отражения от угла скольжения для длин волн 0,154 нм и 9,34 нм и их подгонка (красные кривые).

На рисунке 2.16 представлена кривая диффузного рассеяния, измеренная в первом брэгговском пике для структуры с параметрами $N = 150$ (число периодов), $d = 3,455 \text{ нм}$ (величина периода), $\beta = 0,45$ (доля рутения в периоде). Кривая

диффузного рассеяния была получена следующим образом: образец и детектор поворачивались относительно неподвижного источника излучения на угол, соответствующий первому Брэгговскому пику, после чего проводилось измерение коэффициента отражения при различных углах поворота образца. Положение детектора при этом оставалось фиксированным. Данный тип измерений позволяет детектировать излучение, рассеянное в широком диапазоне углов, так как для всех углов падения излучения на образец выполняется условие конструктивной интерференции: $\sin\vartheta_{in} + \sin\vartheta_{sc} \approx 2 \sin\vartheta_{Br}$, где ϑ_{in} – скользящий угол падения на образец, ϑ_{sc} – угол между рассеянным лучом и плоскостью образца и ϑ_{Br} – брэгговский угол.

Совместный анализ кривых диффузного рассеяния и зеркального отражения позволяет провести разделение между геометрической шероховатостью, являющейся результатом деформации границы между слоями разных материалов как целого, а также диффузной шероховатостью, являющейся следствием перемешивания материалов на границе в силу диффузии атомов и химического взаимодействия. В рамках выбранной модели предполагалось, что геометрическая шероховатость одинаковая для обеих границ. Для расчета шероховатостей границ была выбрана линейная модель роста [62, 63], в рамках которой PSD-функция (power spectral density, то есть спектральная плотность мощности) интерфейсов частично наследуется от предыдущих, а частично заменяется на ростовую:

$$PSD_{2D}(v) = PSD_{sub}(v)e^{-b(v)h} + \Omega \frac{1-e^{-b(v)h}}{e^{-b(v)h}}, \quad (2.3)$$

где $PSD_{sub}(v)$ соответствует подложке, $e^{-b(v)h}$ – фактор наследования, Ω – объём осаждаемой частицы (атома, молекулы или кластера), h – толщина плёнки, $b(v)$ – функция релаксации поверхности. В качестве модели, описывающей PSD – функцию подложки была выбрана ABC модель [62, 63]. PSD – функция подложки при этом имеет вид:

$$PSD_{sub}(v) = \frac{4\pi\sigma^2\xi^2\alpha}{(1+\xi^2(2\pi v)^2)^{\alpha+1}}, \quad (2.4)$$

где σ – полная среднеквадратичная шероховатость подложки, α – фрактальная размерность, определяющая скорость, с которой спектр спадает в область высоких частот, ξ – длина кросс-корреляции (поперечная длина корреляции, т.е. вдоль слоя).

Значение шероховатости слоев при этом получалось путем интегрирования PSD-функции в заданном диапазоне пространственных частот, который определялся из условия: $2\pi\nu = k(\cos\vartheta_0 - \cos\vartheta)$, где ν – значение пространственной частоты, ϑ_0 – угол, соответствующий зеркальному отражению, ϑ – угол рассеяния, k – волновой вектор. Для получения нижней границы интегрирования выбиралось значение угла рассеяния, близкое к Брэгговскому пику, для получения верхней границы – значение, соответствующее углу максимального рассеяния.

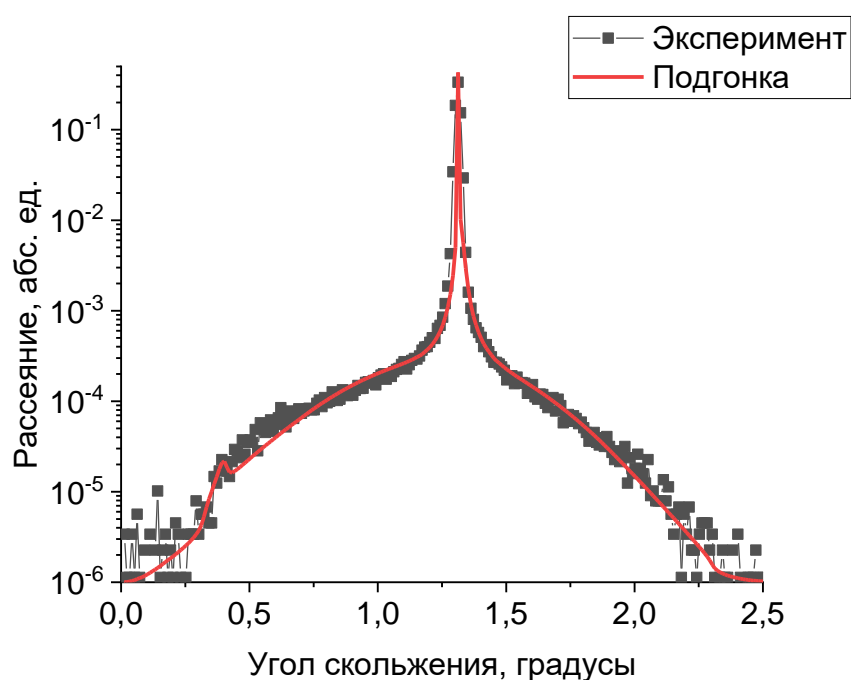


Рисунок 2.16 – Экспериментальная кривая диффузного рассеяния (черная кривая), снятая в первом брэгговском пике, и ее подгонка (красная кривая).

Из представленных данных следует, что величина геометрической шероховатости составляет $\sigma = 0,074$ нм при общей ширине переходной области 0,23 нм, а, следовательно, основной вклад в снижение коэффициента отражения вносит перемешивание материалов.

Зависимость внутренних напряжений, измеренных для ряда синтезированных структур интерферометрическим методом, от доли рутения в периоде многослойного зеркала, приведена на рисунке 2.17.

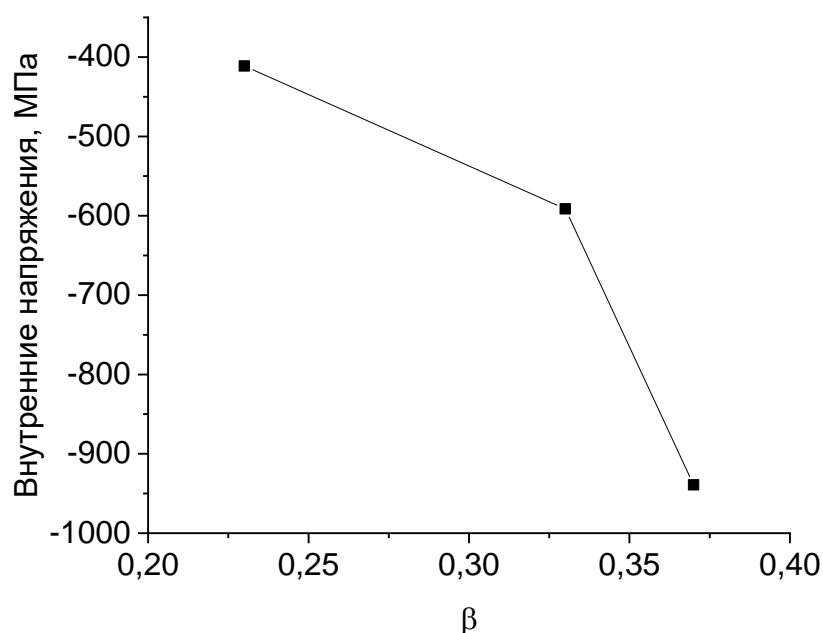


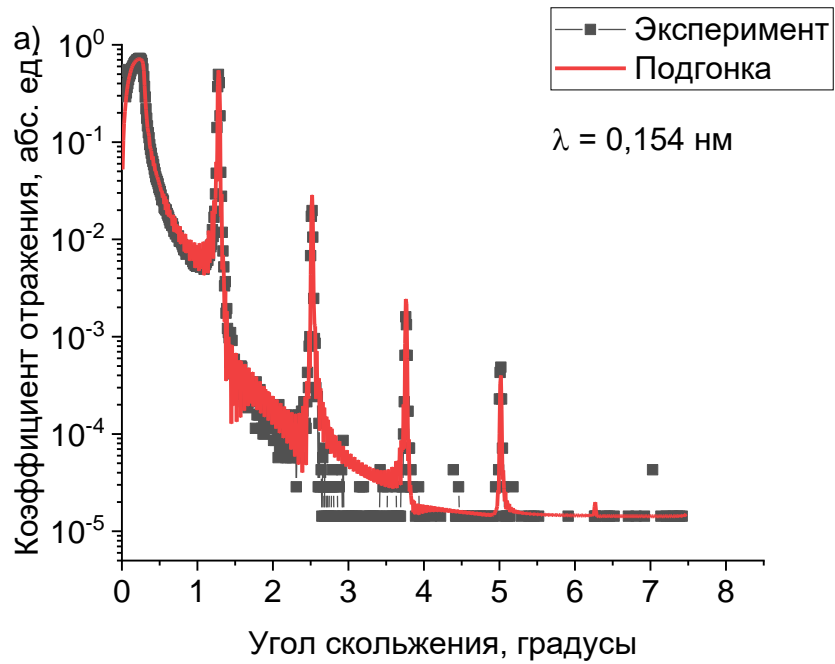
Рисунок 2.17 – Зависимость внутренних напряжений от доли рутения в периоде.

Исходя из представленных данных можно сделать несколько выводов. Во-первых, внутренние напряжения имеют отрицательный знак во всем диапазоне исследуемого параметра β . Во-вторых, величина внутренних напряжений растет по модулю с увеличением доли рутения в структуре. Для компенсации внутренних напряжений может быть проведена процедура отжига структуры или нанесения «антистрессового» подслоя, который бы имел противоположный, в данном случае – положительный, знак внутренних напряжений.

Таким образом, были исследованы структурные параметры и отражательные характеристики Ru/V₄C зеркал. Показано, что для любой доли рутения в периоде величина переходных областей находится на уровне 0,2 нм. Анализ кривых диффузного рассеяния показывает, что основной вклад в формирование переходной области делают процессы перемешивания. При этом величина переходной области остается малой для структур с большим значением периода, что свидетельствует о том, что Ru/V₄C зеркала могут эффективно работать во всем диапазоне длин волн 6,6 – 9 нм и являться хорошей альтернативой La/V₄C зеркалам.

2.6 Синтез и изучение свойств МРЗ Ru/V

Для исследования структурных параметров многослойных зеркал Ru/V был синтезирован ряд образцов с разными значениями параметра $\beta = d_{\text{Ru}}/d$, где d_{Ru} – толщина рутения в периоде структуры, d – период многослойного зеркала. На рисунке 2.18 приведен пример подгонки экспериментальных кривых в программе Multifitting, на основе которого были определены структурные параметры. Значения параметров приведены в таблице 2.5.



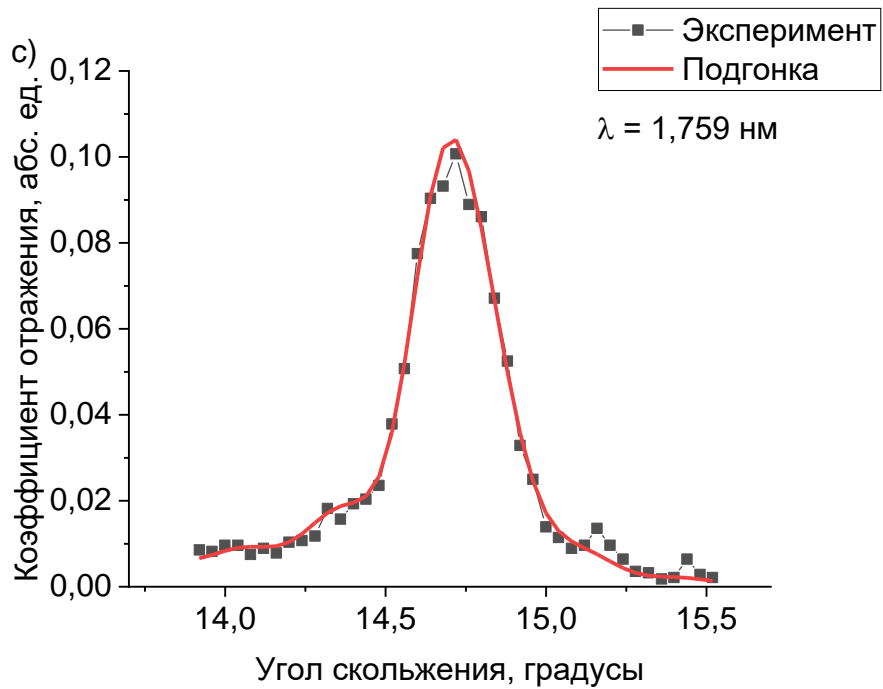
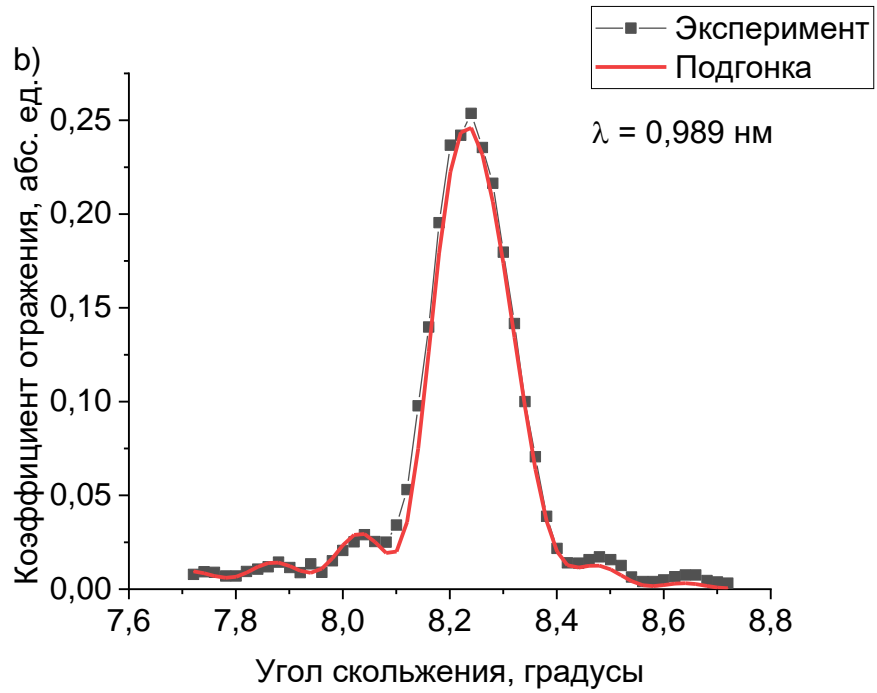


Рисунок 2.18 – Зависимость экспериментально измеренного коэффициента отражения от угла скольжения излучения (черная кривая) и подгонки (красная кривая) для длин волн $\lambda = 0,154$ нм (а), $\lambda = 0,989$ нм (b) и $\lambda = 1,759$ нм (с).

Таблица 2.5 – Структурные параметры изученных образцов. S_{Ru} и S_B – ширины переходных слоев на границах В-на-Ru и Ru-на-В соответственно.

Структура	Период, нм	β	S_Ru, нм	S_B, нм
Ru/B	3,435	0,48	0,57	0,22
Ru/B	3,425	0,39	0,69	0,21
Ru/B	3,530	0,34	0,62	0,18
Ru/B	3,635	0,3	0,69	0,24
Ru/B/C	3,425	0,43	0,70	0,21
Ru/C/B	3,509	0,38	0,37	0,21

Из представленных в таблице 2.5 данных следует, что присутствует асимметрия в переходных областях на различных границах: переходная область на границе В-на-Ru является более протяженной, чем на границе Ru-на-В. Для уменьшения протяженности переходных областей на границе в структуру были добавлены барьерные слои углерода. Добавление углерода на слои бора не привело к улучшению границы, в то время как нанесение слоев углерода на рутений позволило существенно снизить величину переходной области со значений 0,69 нм до значений 0,37 нм. Толщина слоев углерода при этом составляла 0,33 нм. На рисунке 2.19 приведен численный расчет зависимости коэффициента отражения от угла падения излучения на длине волны $\lambda = 6,65$ нм для многослойного зеркала Ru/B с барьерными слоями углерода с учетом полученных значений величины переходных областей. Число периодов в расчете было выбрано $N = 250$.

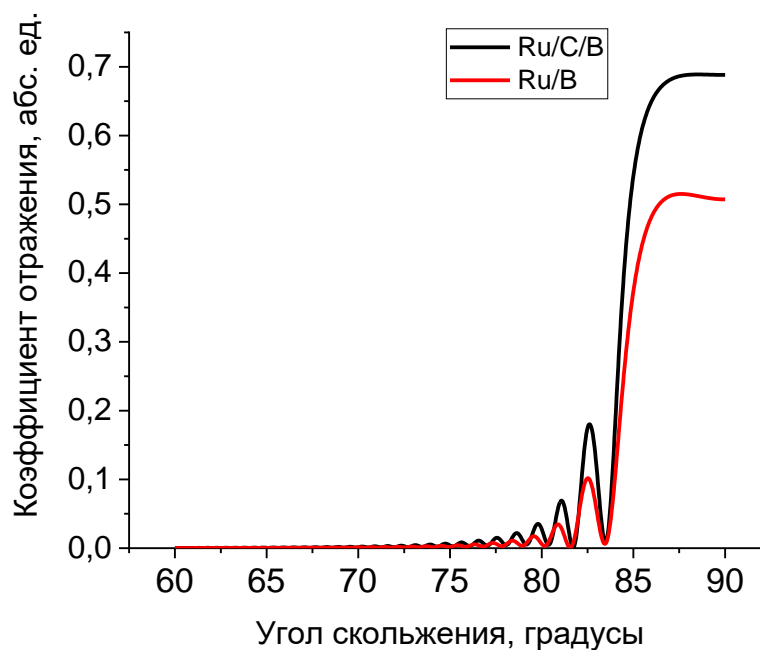


Рисунок 2.19 – Теоретическая зависимость коэффициента отражения от угла скольжения излучения на длине волны $\lambda = 6,65$ нм для многослойного зеркала Ru/C/B (черная кривая) и Ru/B (красная кривая) с учетом полученных структурных параметров.

Из представленного графика видно, при использовании структур на основе рутения и бора с применением методики барьерных слоев на длине волны $\lambda = 6,65$ нм может быть получен коэффициент отражения $R = 68,9\%$, что превосходит полученный ранее коэффициент отражения $R = 64,1\%$ для LaN/B структур. Таким образом, несмотря на то, что идеальные Ru/B структуры теоретически обладают меньшим значением коэффициента отражения в окрестности длины волны 6,7 нм, чем La/B структуры в силу своих оптических характеристик, коэффициент отражения, который может быть получен экспериментально для структур на основе рутения оказывается выше, чем для структур на основе лантана в силу малых значений величины переходных областей. Следовательно, Ru/C/B структуры могут являться перспективными для использования их в качестве отражающих элементах в оптических схемах в спектральном диапазоне 6,6 – 9 нм.

2.7 Основные результаты главы 2

- 1) Синтез структур Cr/C в смеси газов «аргон + азот» не позволил увеличить коэффициент отражения, так как при добавлении в рабочий объем азота плотность хрома начинает падать в силу уменьшения оптического контраста. Пассивация слоев углерода позволила уменьшить величину переходной области на границе Cr-на-C с 0,51 нм до 0,39 нм, что позволило получить рекордное значение для коэффициента отражения Cr/C зеркал нормального падения на длине волны $\lambda = 4,47$ нм: $R = 20,2$ %. Пассивация слоев хрома не привела к улучшению границы C-на-Cr.
- 2) Многослойные зеркала Ru/V₄C обладают низкими значениями ширины переходных областей на уровне 0,2 нм для любой величины доли рутения в периоде, что позволило получить значения коэффициентов отражения в рентгеновском диапазоне близкие к предельным значениям на длине волны 9,34 нм. Показано, что данные структуры эффективно перекрывают весь диапазон 6,6 – 9 нм.
- 3) В многослойных зеркалах Ru/V граница V-на-Ru является более протяженной (0,69 нм), чем граница Ru-на-V (0,21 нм). Нанесение слоев углерода с толщиной 0,33 нм на протяженную границу позволяет уменьшить величину переходной области до 0,37 нм.

Глава 3. Многослойные зеркала для спектрального диапазона 9-12 нм

3.1 Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ, оптимизированных на спектральный диапазон 9-12 нм

Одним из спектральных диапазонов, представляющих интерес для прикладных и фундаментальных исследований, является область мягкого рентгеновского излучения 9-12 нм. Среди научных задач, относящихся к данному спектральному диапазону, можно выделить солнечную астрономию.

Одной из ярких характерных линий, присутствующих в солнечном спектре, является линия излучения иона Fe XVIII (9,4 нм) [5], которые формируются в верхних слоях короны Солнца. Однако до сих пор корона Солнца изучалась преимущественно в более длинноволновой части спектра 17-30 нм, в которой излучают ионы, соответствующие нижним и средним слоям солнечной короны. Это предпочтение во многом определяется наличием относительно высоких коэффициентов отражения многослойных зеркал для этого диапазона [64]. Наиболее высокие коэффициенты отражения (свыше 70%) демонстрируют МРЗ на основе кремния [1, 2] и бериллия [3, 4]. Однако МРЗ Mo/Si имеют низкий коэффициент отражения при $\lambda < 12,4$ нм (L-край поглощения Si) из-за высокого поглощения в слоях Si. Оптика на основе бериллия неэффективна при $\lambda < 11,1$ нм (K-край поглощения Be). Следовательно, для изучения верхних слоев солнечной короны требуется разработать и создать многослойные зеркала с высокими значениями коэффициента отражения в более коротковолновой области спектра.

Другим направлением, связанным с работой в данном спектральном диапазоне, является проекционная литография следующего поколения. На данный момент активно обсуждается переход к литографии на длинах волн 11,2 нм и 10,8 нм, которые соответствуют максимумам излучения ксеноновой плазмы [9, 11]. Однако продвижение технологии проекционной литографии в спектральный диапазон длин волн короче 11,1 нм сдерживается отсутствием достаточных (более 60%) коэффициентов отражения МРЗ.

Анализ зависимостей действительной (δ) и мнимой (γ) поправок к диэлектрической проницаемости (рисунок 3.1) в спектральной области 9 – 12 нм позволяет оценить, какие материалы являются наиболее перспективными для синтеза на их основе высокоотражающих зеркал.

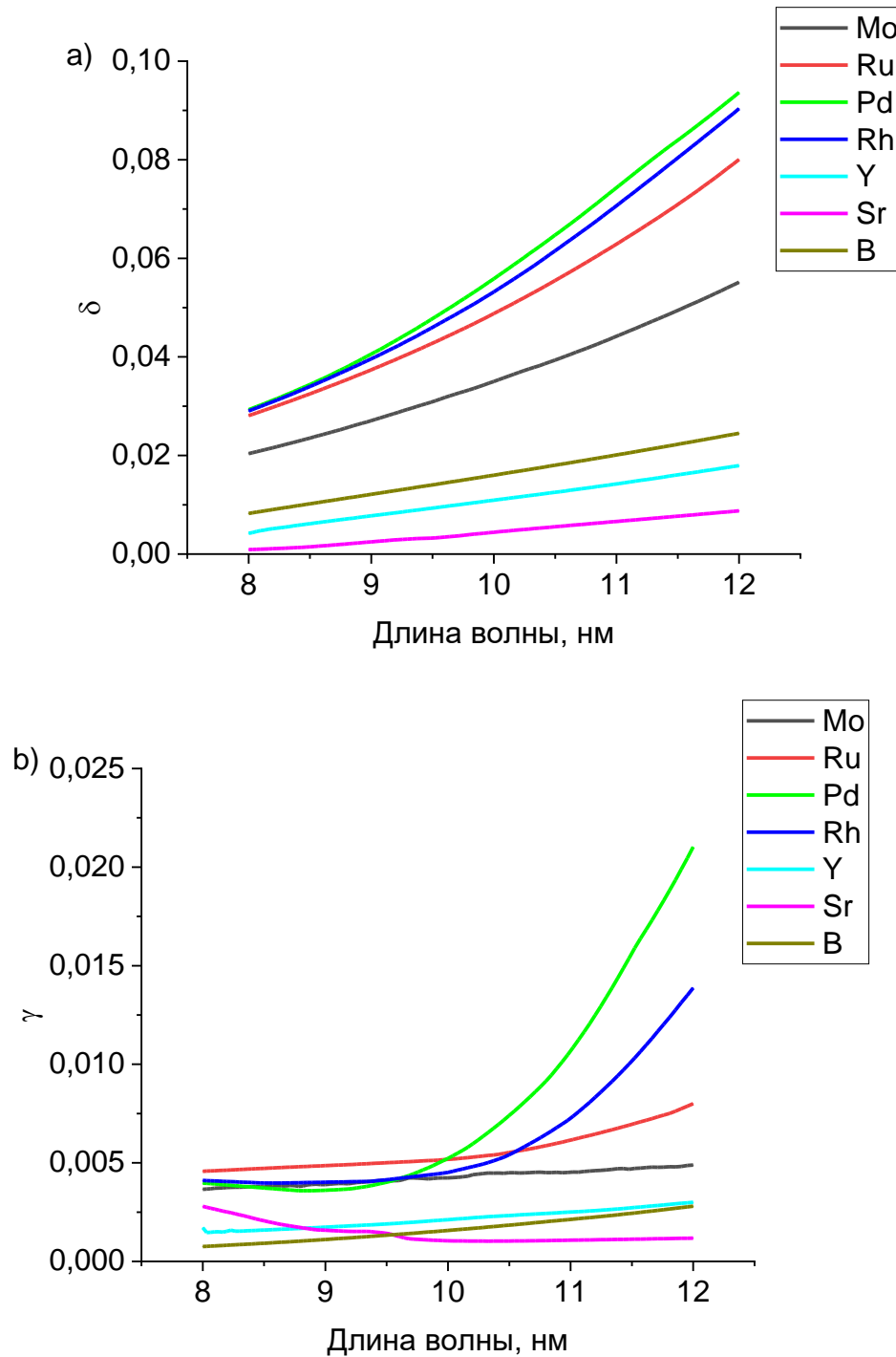


Рисунок 3.1 – Спектральные зависимости поправок к реальной части (a) и мнимой части (b) диэлектрической проницаемости.

Теоретические расчеты указывают на то, что в указанном спектральном диапазоне наилучшими материалами для слабопоглощающих слоев являются Sr и Y, а в качестве материалов сильнопоглощающих слоев: Pd, Rh, Ru, Mo. На рисунке 3.2. приведены зависимости коэффициентов отражения для идеальных структур на основе иттрия и стронция.

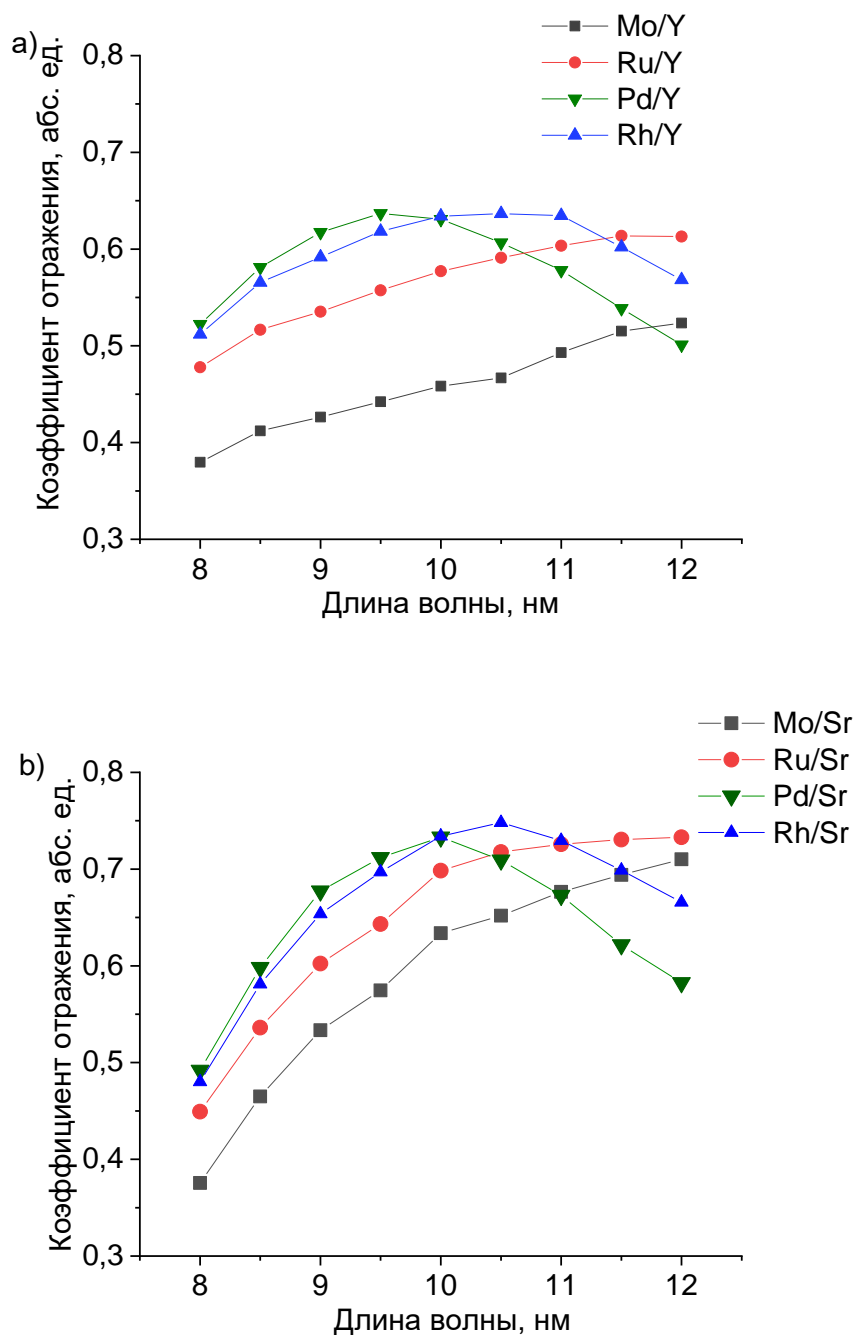


Рисунок 3.2 – Теоретические зависимости коэффициентов отражения идеальных (нулевая шероховатость, табличные плотности) многослойных зеркал на основе Y (a) и Sr (b) в диапазоне длин волн 8-12 нм.

В работе [66] экспериментально исследовались МРЗ Мо/Sr. Были получены зеркала с коэффициентом отражения 40,8% при теоретически возможных значениях более 70% (длина волны 9,4 нм). Однако из-за высокой химической активности стронция тонкопленочные структуры на его основе быстро окислялись. Спустя 24 часа с момента синтеза коэффициент отражения упал с исходных 40,8% до величины ниже 1%, что делает их непригодными для практических приложений. Попытки пассивировать слои и создать защитный слой углерода к успеху не привели. Дальнейшего развития технологии синтеза таких структур не последовало.

Значительно большее число работ посвящено иттрий-содержащим МРЗ. Так в [67-69] исследовались МРЗ Мо/Y. На практике было получено максимальное отражение около 30% при теоретических 42% (для $\lambda=9,34$ нм). В работе [69] показана асимметрия границ раздела (граница Y-на-Mo имеет протяженность около 0,33 нм, а граница Mo-на-Y 0,7 нм). Методом осаждения барьерных слоев удалось уменьшить протяженность интерфейса Mo-на-Y и повысить коэффициент отражения до 32%. На данный момент наибольшее значение коэффициента отражения для Mo/Y-зеркал, оптимизированных на длину волны 9,34 нм, приведено в [70] и составляет 34%.

Теоретически наибольшими коэффициентами отражения в диапазоне 9 – 12 нм окрестности обладают МРЗ Pd/Y, Ag/Y и Ru/Y. Однако значения коэффициента отражения, близкие к максимальному, экспериментально получены не были. Так лучший экспериментальный результат был получен на Pd/Y с барьерными слоями В4С МРЗ и составил 43% на длине волны 9,4 нм [71]. В этой работе так же отмечается деградация отражательных характеристик зеркал Pd/Y. За 16 месяцев наблюдений коэффициент отражения снизился до 34%.

В [72] изучались структуры Pd/Y синтезированные в смеси аргона и азота. Показано, что коэффициент отражения Pd(N)/Y(N) зеркал составлял 30% при доле азота в смеси равной 6%. В статье отмечено, что использование азота, с одной стороны, снижает перемешивание слоев, но, в тоже время, увеличивает поглощение слоев YN по сравнению со слоями Y, изготавливаемыми в чистом аргоне. Аналогичные эксперименты в смеси с азотом были выполнены в статье [73]. Полученные в этой работе результаты, были схожи с [72]. В работе [74] были

синтезированы Pd/V₄C структуры, имеющие коэффициент отражения 32%, при этом доля азота в смеси с аргоном составляла 15%. Таким образом, можно заключить, что применение распыления в смеси газов «аргон + азот» не позволило существенно приблизиться к теоретическому максимуму коэффициента отражения, а наилучшим способом устранения перемешивания слоев в структуре является применение барьерных V₄C прослоек.

Также можно отметить работы по изучению МРЗ Ag/Y [75, 76]. В этих работах установлена чувствительность отражательных характеристик Ag/Y к материалу верхнего слоя, определены ширины переходных границ. Лучший коэффициент отражения на длине волны 9,34 нм был получен для МРЗ Ag/Si/Y (Si – тонкий барьерный слой) и составил 18%. Тем не менее, видно, что МРЗ на основе Ag/Y по отражению заметно уступают Mo/Y и Pd/Y.

В работе [77] изучались Ru/Y зеркала. Однако лучший экспериментально полученный коэффициент отражения на длине волны 9,34 нм составлял лишь 34%. В работах не использовались антидиффузионные прослойки. Также отсутствует детальная информация о ширинах переходных областей и данные по отражательным характеристикам МРЗ Ru/Y в окрестности $\lambda=11-12$ нм. Интерес к отражательным характеристикам иттрий-содержащих зеркал в этом диапазоне обусловлен возможностью замены бериллий-содержащих многослойных зеркал, в силу токсичности бериллия. Теоретические расчеты показывают, что в этом диапазоне Ru/Y зеркала являются крайне перспективными с теоретически возможным коэффициентом отражения более 60%, который даже превосходит оценки для Pd/Y МРЗ. На рисунке 3.3 приведена теоретическая зависимость спектральной селективности идеальных структур нормального падения на основе Ru/Y и Pd/Y.

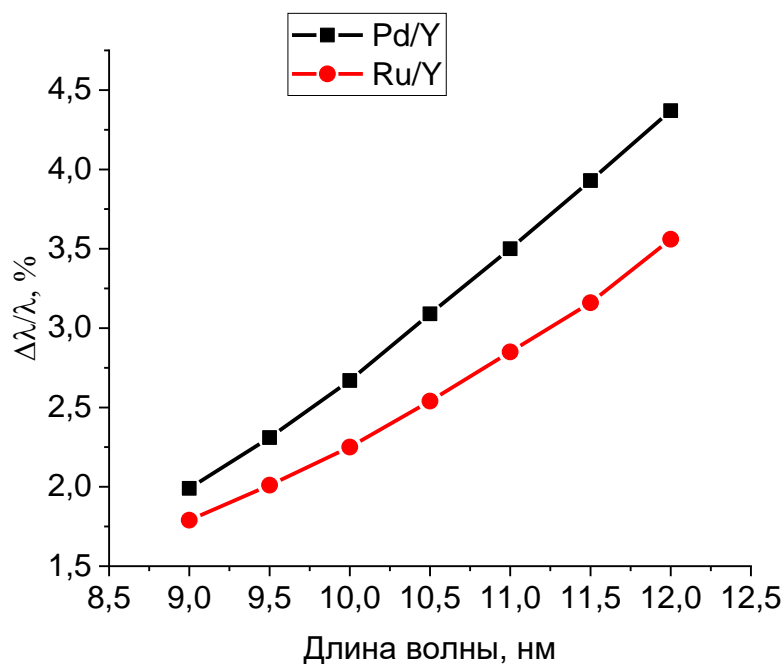


Рисунок 3.3 – Расчетная зависимость спектральной селективности для Pd/Y и Ru/Y идеальных зеркал нормального падения.

Из представленной зависимости видно, что во всем диапазоне длин волн 9 - 12 нм Ru/Y зеркала обладают лучшей спектральной селективностью, чем Pd/Y, что является важным в приложениях по спектроскопии и солнечной астрономии.

Теоретические расчет для Sr зеркал свидетельствует о возможности создания структур с существенно более высокими значениями коэффициента отражения, чем у Y-содержащих, однако найденные в литературе данные демонстрируют сильную деградацию отражательных характеристик Ru/Sr структур в силу химической активности стронция. Следовательно, можно заключить, что задача по разработке и синтезу многослойных рентгеновских зеркал на основе Y и Sr, оптимизированных на рабочий диапазон длин волн 9 – 12 нм, остается актуальной.

3.2 Свойства МРЗ на основе иттрия

В ходе экспериментов МРЗ Ru/Y синтезировались методом магнетронного распыления на установке, описанной в разделе 2.1. Давление остаточных газов в камере перед началом синтеза структур находилось на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Многослойные зеркала осаждались на кремниевые подложки (среднеквадратичная величина шероховатости 0,1–0,2 нм). Распыление мишеней осуществляется на постоянном токе в среде высокочистого (99,998%) аргон. Рабочее давление газа в технологическом процессе составляет $\sim 0,1$ Па. Параметры магнетронного разряда имели следующие значения $I_{B4C} = 400$ мА, $I_Y = 400$ мА, $I_{Ru} = 300$ мА, $U_{B4C} = 310$ В, $U_Y = 266$ В, $U_{Ru} = 260$ В.

Измерения кривых зеркального отражения рентгеновского излучения проводились на длинах волн $\lambda = 0,154$ нм, $\lambda = 9,34$ нм и $\lambda = 11,4$ нм. Измерения на длине волны $\lambda = 0,154$ нм проводились с использованием высокоразрешающего четырехкристального дифрактометра PANalytical X'Pert Pro. Измерения коэффициентов отражения в окрестностях длин волн 9,34 и 11,4 нм проводились на лабораторном рефлектометре со спектрометром-монохроматором РСМ-500 и на рефлектометре, установленном на Optics Beamline channel of the BESSY-2 synchrotron (Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung, Berlin). Определение ключевых параметров синтезированных зеркал, таких как период, толщины индивидуальных слоев и протяженность межслоевых границ раздела осуществлялось с использованием открытого программного обеспечения Multifitting путем одновременной подгонки кривых измеренных на разных длинах волн.

На первом этапе экспериментов изучалась зависимость пикового коэффициента отражения R от доли рутения в периоде (параметр β) серии Ru/Y многослойных зеркал (образцы ## 1-8) (рисунок 3.4). Период зеркал оптимизирован под близкое к нормальному падению излучения с длиной волны 9,34 нм. Общее число периодов в изучаемых зеркалах $N = 90$ (заведомо превышает глубину экстинкции). Восстановленные структурные параметры представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень исследованных образцов с указанием их основных параметров и характеристик. d – период зеркала, β – доля рутения в периоде, R – измеренный на длине волны 9,34 нм коэффициент отражения.

Номер зеркала	Состав (порядок материалов от подложки к поверхности)	d , нм	$\beta=d_{Ru}/d$	R , абс. ед.
#1	Y/Ru	5,12	0,35	0,18
#2	Y/Ru	5,05	0,39	0,19
#3	Y/Ru	5,06	0,43	0,23
#4	Y/Ru	4,85	0,45	0,27
#5	Y/Ru	4,88	0,5	0,285
#6	Y/Ru	4,84	0,54	0,29
#7	Y/Ru	4,9	0,57	0,28
#8	Y/Ru	4,84	0,6	0,24

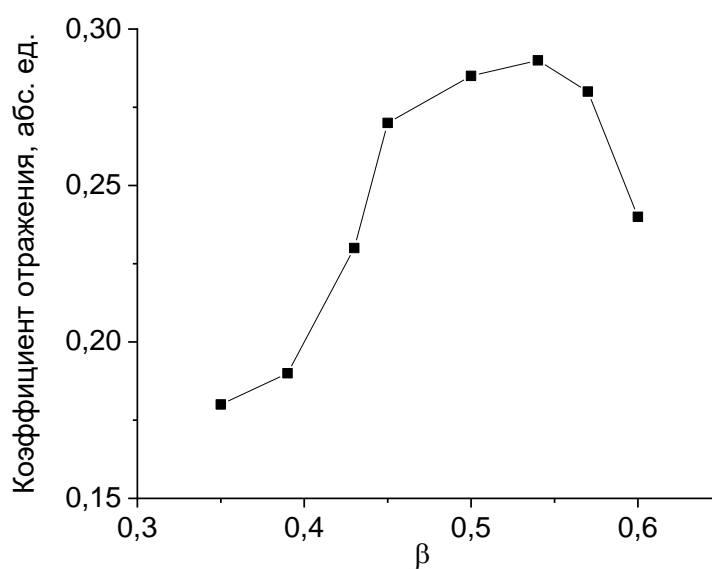


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента отражения Ru/Y структур от толщины слоя рутения в периоде. Измерения на лабораторном рефлектометре, длина волны 9,34 нм.

Как видно из рисунка 3.4, максимальное значение коэффициента отражения $R = 29\%$ достигается при значении $\beta = 0,54$ (образец #6). Пример подгонки кривых зеркального отражения для данного образца приведен на рисунке 3.5, восстановленный профиль электронной плотности - на рисунке 3.6.

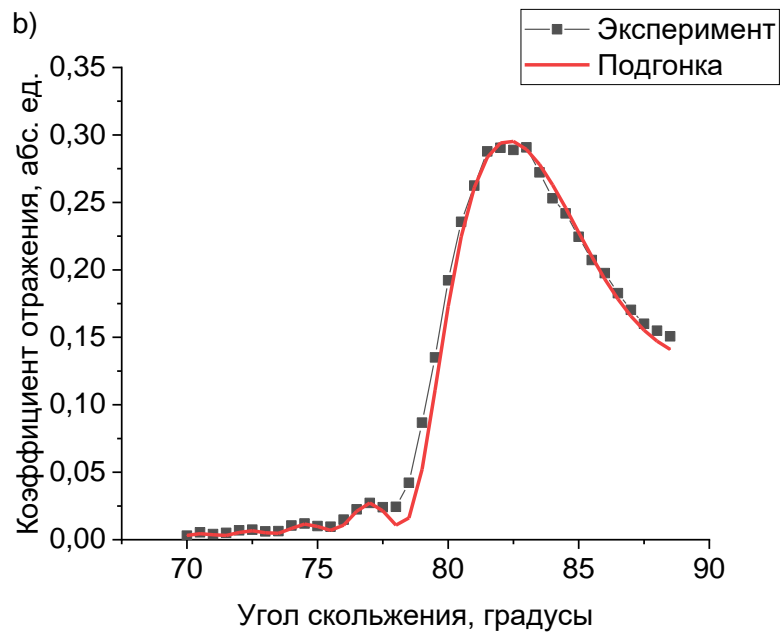
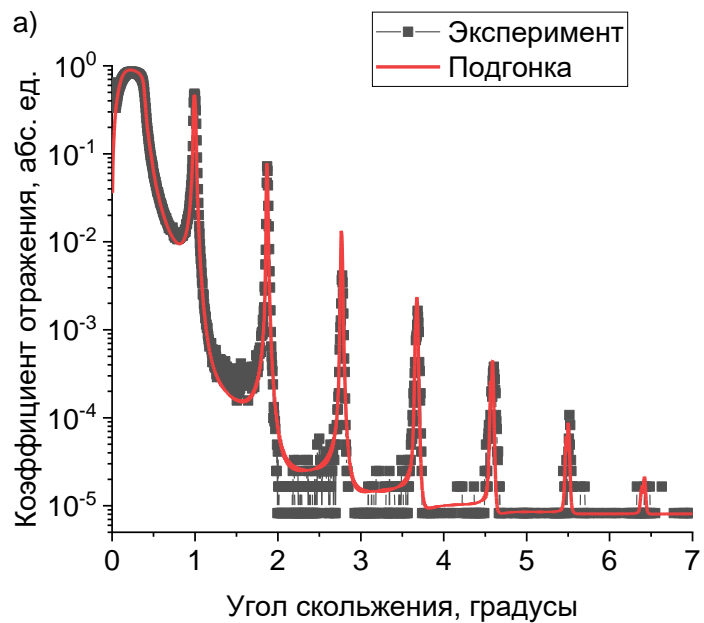


Рисунок 3.5 – Экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла скольжения излучения (черные кривые) и их подгонка (красные кривые) для образца Ru/Y #6, измеренные на длине волны $\lambda = 0,154$ нм (а) и на длине волны $\lambda = 9,34$ нм (б).

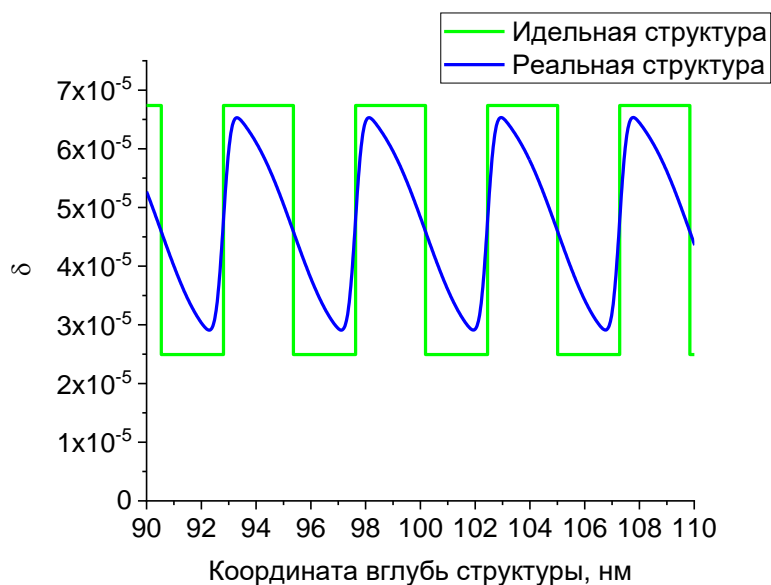


Рисунок 3.6 – Восстановленный профиль электронной плотности (синяя кривая) для образца #6. Зеленая кривая соответствует идеальной структуре.

Отличие экспериментального коэффициента отражения от теоретического предела объясняется наличием в структуре протяженных переходных интерфейсов: Y-на-Ru $S = 0,2$ нм и Ru-на-Y $S = 1,3$ нм. На втором этапе экспериментов для улучшения межслоевых границ была применена методика интерфейс-инжиниринга, которая заключалась в нанесении барьерных слоев карбида бора на границы раздела материалов. В таблице 3.2 приведены параметры зеркал Ru/Y с прослойками B_4C . На рисунке 3.7 представлена зависимость коэффициента отражения от толщины барьерного слоя.

Таблица 3.2 – Структурные параметры и отражательные характеристики Ru/Y зеркал с барьерными слоями В₄С. d – период зеркала, λ – рабочая длина волны, R – измеренный на рабочей длине волны коэффициент отражения.

Номер зеркала	Состав (порядок материалов от подложки к поверхности)	d, нм	Толщина В ₄ С, нм	λ , нм	R, абс. ед.
#9	Y/B ₄ C/Ru	4,86	0,1	9,34	0,345
#10	Y/B ₄ C/Ru	4,86	0,2	9,34	0,36
#11	Y/B ₄ C/Ru	4,84	0,3	9,34	0,375
#12	Y/B ₄ C/Ru	4,84	0,4	9,34	0,385
#13	Y/B ₄ C/Ru	4,84	0,5	9,34	0,34
#14	B ₄ C/Y/B ₄ C/Ru	4,84	0,4 + 0,4	9,34	0,38
#15	Y/B ₄ C/Ru	5,95	0,4	11,4	0,54

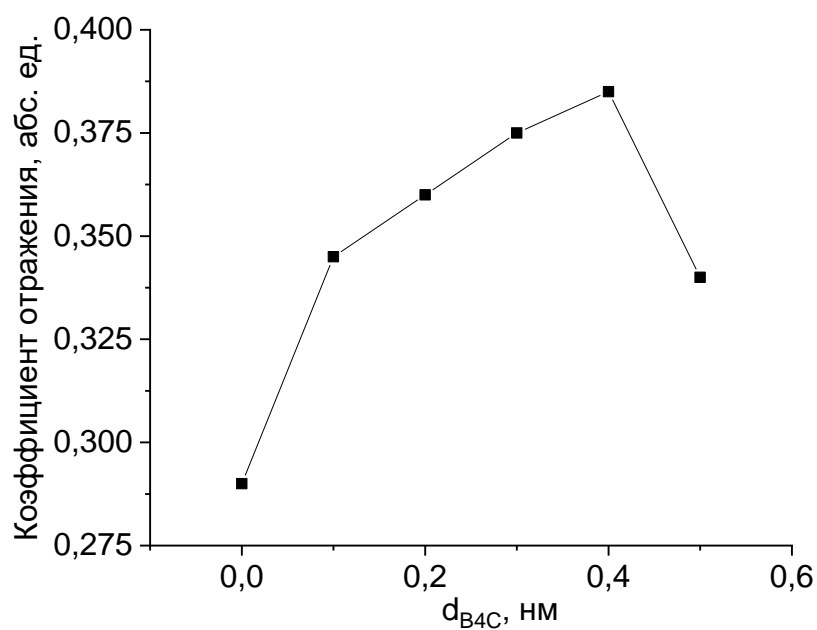


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента отражения Ru/Y зеркал от толщины слоя карбида бора, нанесенного на слои иттрия.

Оптимальное значение толщины барьерного слоя составляет величину $d_{\text{B4C}} = 0,4$ нм для получения максимального коэффициента отражения. На рисунке 3.8 приведены результаты подгонки кривых зеркального отражения данного образца, измеренных на длинах волн $\lambda = 0,154$ нм и $\lambda = 9,34$ нм. На рисунке 3.9 приведен восстановленный профиль электронной плотности.

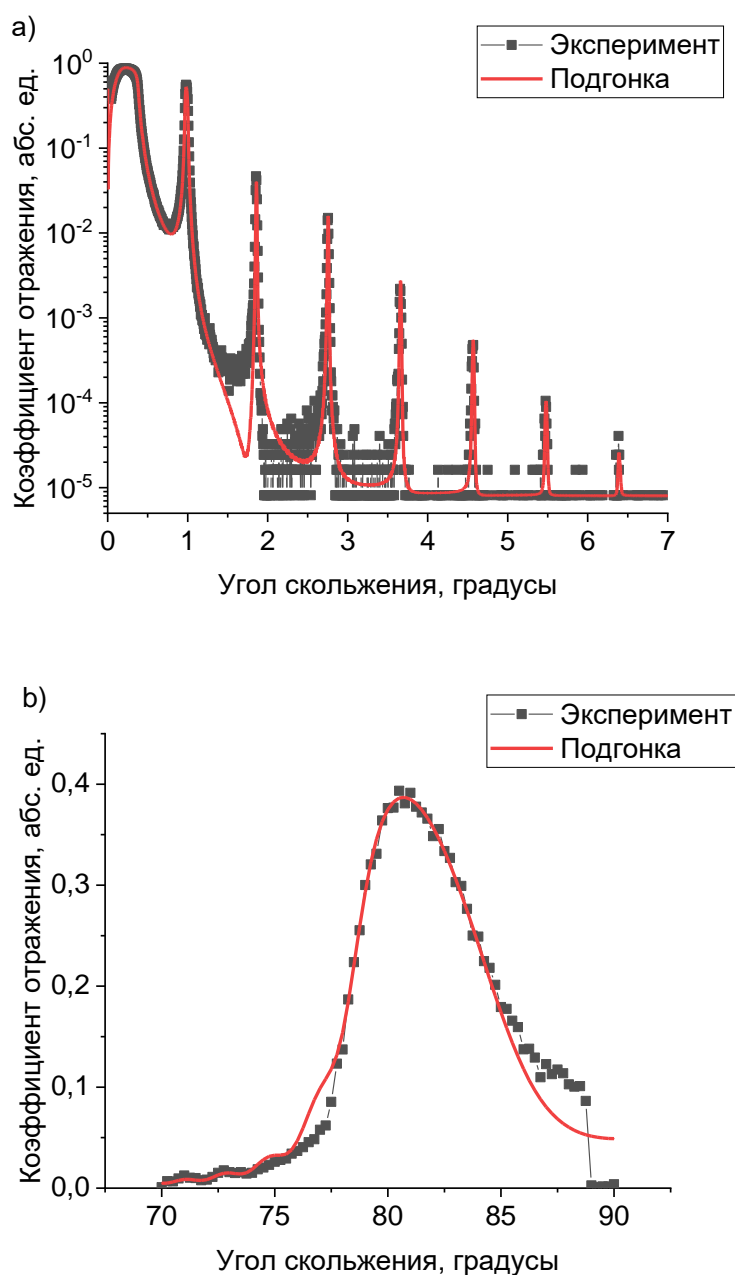


Рисунок 3.8 – Экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла скольжения излучения (черные кривые) и их подгонка (красные кривые) для

образца Ru/Y #12, измеренные на длине волны $\lambda = 0,154$ нм (а) и на длине волны $\lambda = 9,34$ нм (b).

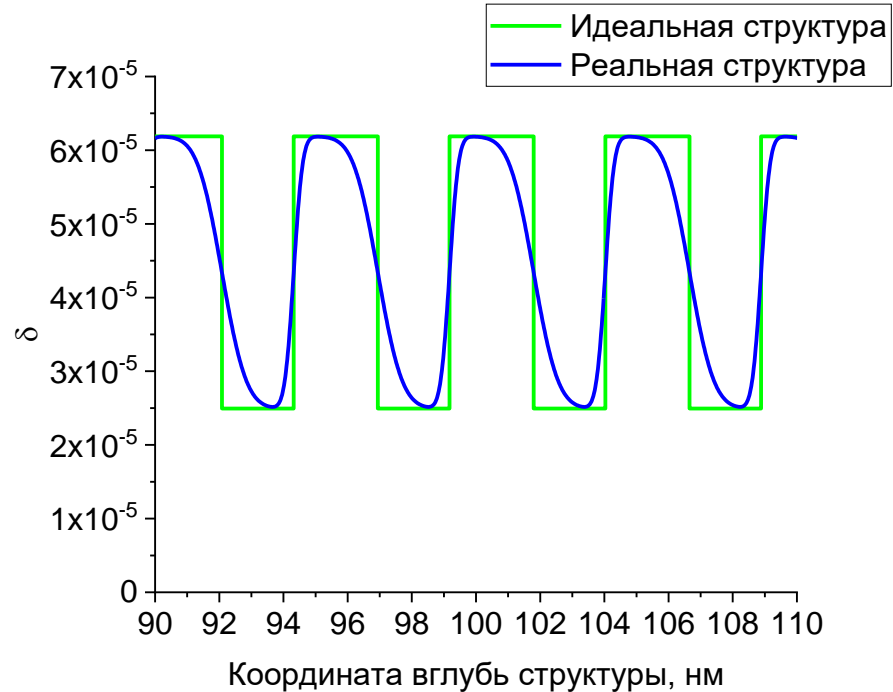


Рисунок 3.9 – Восстановленный профиль электронной плотности (синяя кривая) для образца #12. Зеленая кривая соответствует идеальной структуре.

Из представленных данных можно сделать несколько выводов. Во-первых, нанесение карбида бора на слой иттрия позволяет существенно уменьшить протяженность границы Ru-на-Y. При оптимальной толщине барьерного слоя $d_{\text{В4С}} = 0,4$ нм величина интерфейса Ru-на-Y составляет $S = 0,6$ нм, что почти в два раза меньше, чем в случае Ru/Y зеркал без барьерных слоев – $S = 1,3$ нм. При дальнейшем увеличении толщины барьерного слоя граница начинает ухудшаться. Во-вторых, нанесение барьерных слоев на обе границы сразу не дало такой же результат, как нанесение барьерных слоев только на одну границу. Следовательно, можно сделать вывод, что барьерные слои карбида бора не улучшили границу Y-на-Ru. На рисунке 3.10 представлена спектральная зависимость коэффициента отражения для Ru/Y зеркала с барьерными слоями В4С толщиной 0,4 нм, измеренная на синхротроне BESSY II при угле падения излучения 2° . На рисунке 3.11 представлена угловая

зависимость коэффициента отражения для образца #12, измеренная на длине волны 11,4 нм на синхротроне BESSY II.

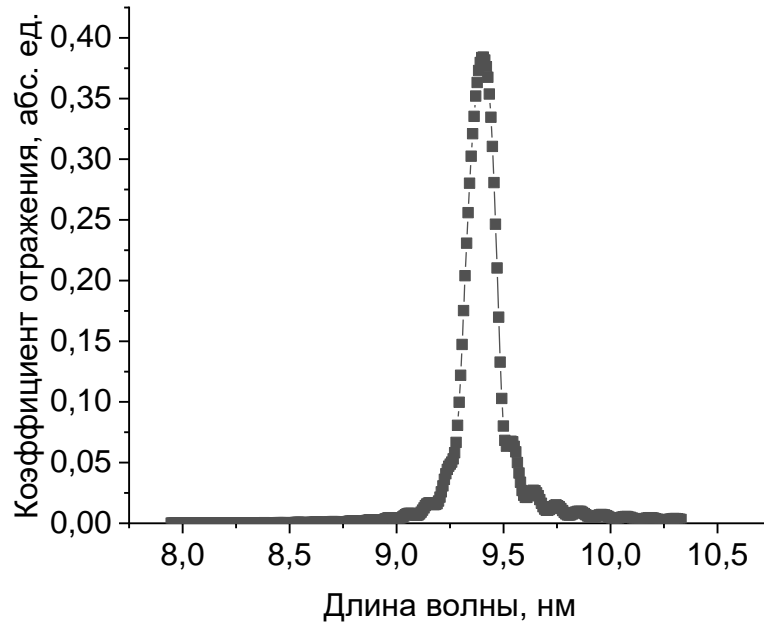


Рисунок 3.10 – Спектральная зависимость коэффициента отражения для зеркал Ru/Y с барьерными слоями карбида бора, измеренная на синхротроне BESSY II при угле падения излучения 2° .

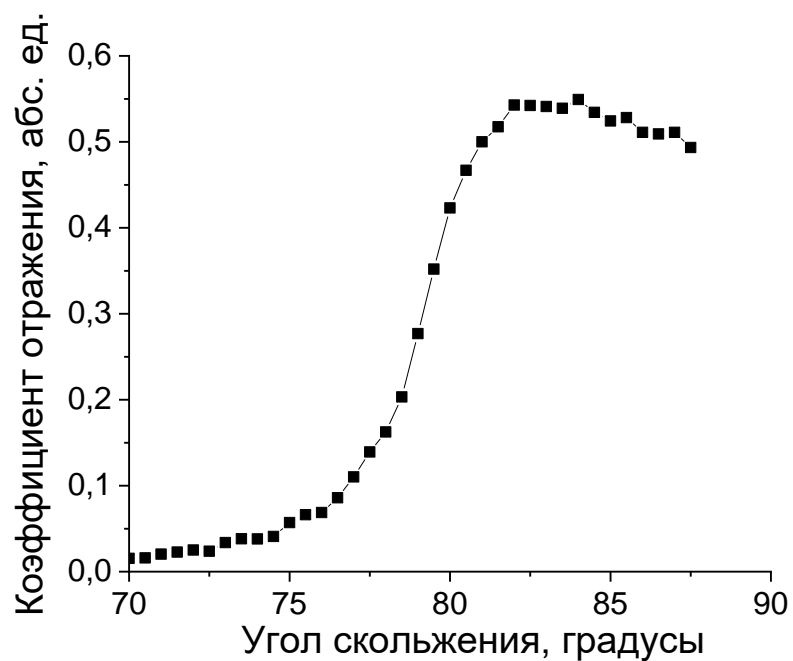


Рисунок 3.11 – Угловая зависимость коэффициента отражения образца #15, измеренная на длине волны 11,4 нм.

Из представленных зависимостей можно сделать несколько выводов. Во-первых, нанесение слоев карбида бора на слои иттрия позволило увеличить значение коэффициента отражения с $R = 29\%$ до $R = 38,5\%$ на длине волны $\lambda = 9,34$ нм за счет уменьшения переходной области Ru-на-Y с 1,3 нм до 0,6 нм. Во-вторых, спектральная селективность Ru/Y зеркал с барьерными слоями В₄С составляет величину $\Delta\lambda/\lambda = 1,7\%$, в то время как спектральная селективность Pd/Y зеркал с барьерными слоями В₄С - $\Delta\lambda/\lambda = 2,1\%$ [71]. Тот факт, что спектральная селективность Ru/Y зеркал на 20 % выше относительно Pd/Y зеркал при близких значениях коэффициента отражения, открывает широкие перспективы по их использованию для задач спектроскопии и солнечной астрономии. В-третьих, применение методики нанесения барьерных слоев позволило получить значение коэффициента отражения $R = 54\%$ для Ru/Y зеркал нормального падения на длине волны $\lambda = 11,4$ нм, что близко к их теоретическому пределу $R = 61\%$ и теоретическому пределу для Pd/Y зеркал $R = 54,7\%$. Исходя из этого можно утверждать, что несмотря на отсутствие в литературе экспериментальных коэффициентов отражения Pd/Y зеркал в окрестности длины волны $\lambda = 11,4$ нм, синтезированные Ru/Y зеркала с барьерными слоями В₄С будут превосходить их. Следовательно, Ru/Y зеркала могут эффективно работать во всем диапазоне длин волн 9 – 12 нм. В-четвертых, измерения, проведенные на синхротроне BESSY II спустя 5 месяцев после синтеза зеркал, показали хорошее соответствие с лабораторными измерениями, проведенными сразу после синтеза, что свидетельствует о высокой временной стабильности отражательных характеристик Ru/Y МРЗ.

3.3 Свойства МРЗ на основе стронция

В данном параграфе приводятся результаты экспериментального изучения МРЗ на основе Ru/Sr. Исследуется влияние барьерных слоев В₄С на отражательные характеристики МРЗ, а также временная стабильность синтезированных структур.

Отдельной проблемой, возникшей в ходе экспериментов, являлось оперирование мишенью стронция до помещения ее в вакуумную камеру. При взаимодействии с атмосферой окисление поверхности мишени происходит за десятки секунд, что требует особых мер предосторожности. Изначально мишень хранилась в контейнере с маслом, исключаящем контакт ее поверхности с атмосферой. Для использования мишени в установке магнетронного напыления она отмывалась от остатков масла органическими реагентами (толуол, изопропиловый спирт). При транспортировке от химической лаборатории до вакуумной камеры мишень помещалась в контейнер с толуолом. Вакуумная камера предварительно наполнялась инертной средой (сухой аргон). Эти меры предосторожности позволили установить мишень внутрь камеры, а наличие вакуумного шлюза позволило исключить последующее взаимодействие стронция с атмосферой.

Первая серия экспериментов была посвящена исследованию двухкомпонентных МРЗ Ru/Sr. На рисунке 3.12 приведены результаты измерения зависимости коэффициента отражения Ru/Sr-зеркала от угла скольжения излучения в жестком рентгеновском диапазоне в день синтеза и через 2 недели. На рисунке 3.13 проведены результаты измерения коэффициента отражения этого же многослойного зеркала на рабочей длине волны 11,4 нм.

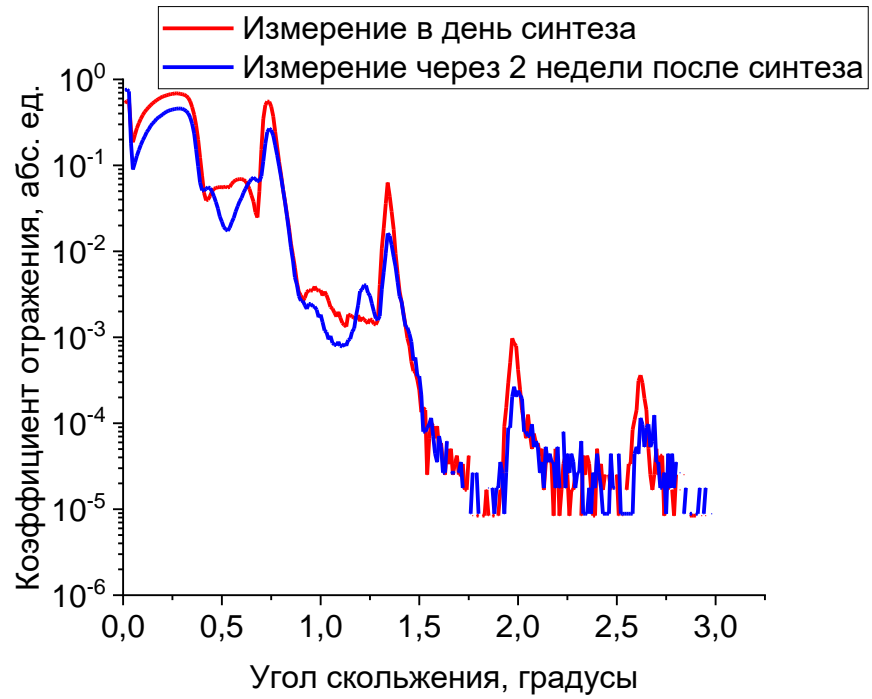


Рисунок 3.12 – Угловая зависимость коэффициента отражения Ru/Sr зеркала на длине волны 0,154 нм, измеренная в день синтеза (красная кривая) и через 2 недели после синтеза (синяя кривая).

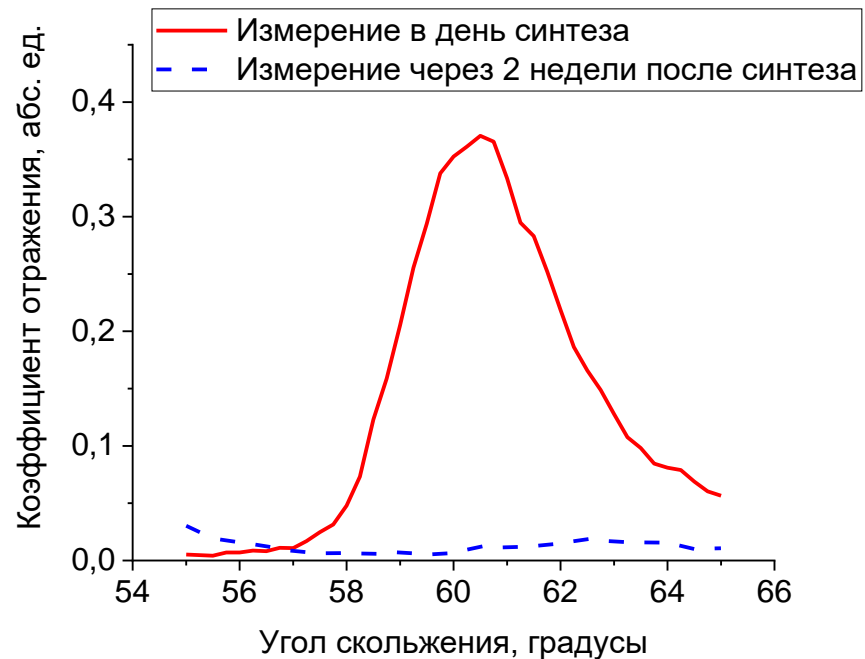
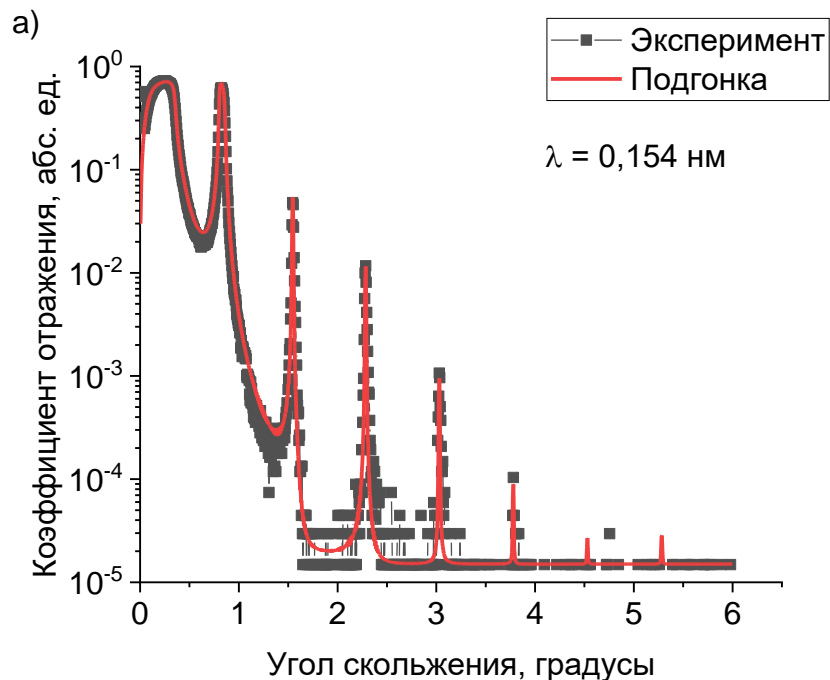


Рисунок 3.13 – Угловая зависимость коэффициента отражения Ru/Sr зеркала на длине волны 11,4 нм, измеренная в день синтеза (сплошная красная кривая) и через 2 недели после синтеза (пунктирная синяя кривая).

Из представленных зависимостей можно увидеть, что максимальный коэффициент отражения Ru/Sr структуры непосредственно после синтеза составлял 37% ($\lambda=11,4$ нм). Это значение существенно ниже теоретического предела $R = 73 \%$ в силу наличия в структуре протяженных межслоевых границ: Ru-на-Sr 1 нм, Sr-на-Ru 0,5 нм. При этом через 2 недели после синтеза значение коэффициента отражения составило величину менее $R < 1 \%$, что повторяет результат, известный из литературы для Mo/Sr зеркал [66], который объясняется окислением слоев структуры при ее контакте с атмосферой.

На втором этапе изучалось влияние барьерных слоев V_4C_5 , нанесенных на более протяженную границу раздела Ru-на-Sr (на поверхность пленок Sr). Такая структура имела вид sub/Sr/ V_4C_5 /Ru, где «sub» обозначает подложку. На рисунке 3.14 приведены результаты измерения угловых зависимостей коэффициента отражения данного зеркала в области жесткого рентгена (0,154 нм) и на рабочей длине волны (9,34 нм), а также результаты их моделирования.



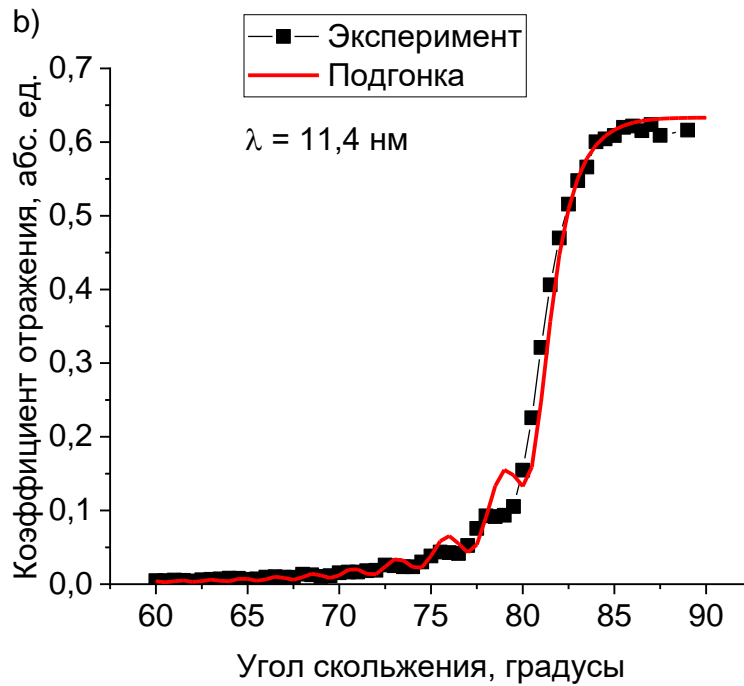


Рисунок 3.14 – Угловые зависимости коэффициента отражения sub/Sr/B₄C/Ru зеркала в жестком рентгеновском диапазоне (а) и на рабочей длине волны (11,4 нм) (b). Звезды соответствуют экспериментальным измерениям, сплошная кривая – моделированию, выполненному в программе Multifitting.

Протяженность переходной границы Ru-на-Sr значительно уменьшилась и составила 0,6 нм. Это привело к существенному увеличению измеренного коэффициента отражения. Из представленной на рисунке 3.14 зависимости видно, что максимальный коэффициент отражения на рабочей длине волны 11,4 нм $R = 62,3\%$ в день синтеза.

Для исследования временной стабильности отражательных характеристик данной структуры были проведены дополнительные измерения ее коэффициента отражения на длине волны 0,154 нм и на длине волны 11,4 нм в день синтеза, через 5 дней после синтеза и через 2 месяца после синтеза. Измерения через 2 месяца после синтеза на рабочей длине волны 11,4 нм проводились на синхротроне BESSY II. Данные измерения представлены на рисунке 3.15.

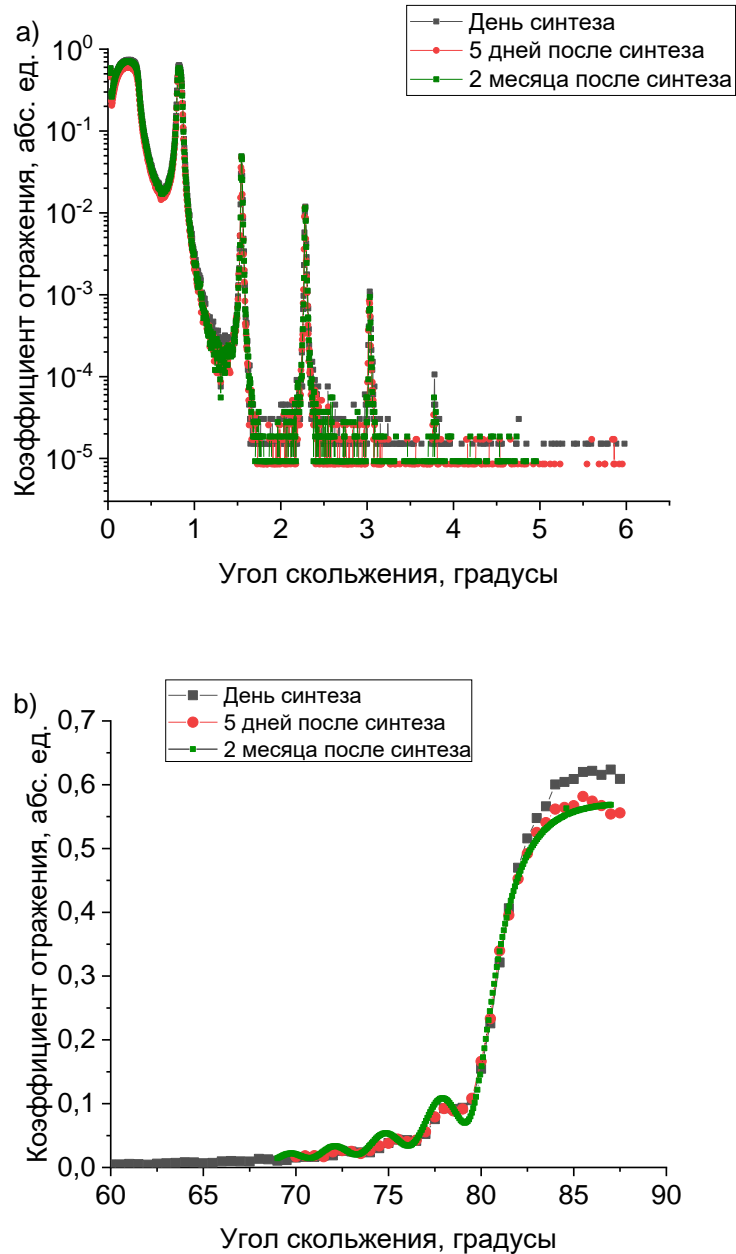


Рисунок 3.15 – Измерение коэффициента отражения sub/Sr/V₄C/Ru структуры на длине волны 0,154 нм (а) и на длине волны 11,4 нм (б) в день напыления (черная кривая), через 5 дней после напыления (красная кривая) и через 2 месяца после напыления (зеленая кривая).

Представленные на рисунке 3.16 результаты демонстрируют, что многослойные зеркала Ru/Sr с барьерными слоями V₄C обладает существенно лучшей временной стабильностью отражательных характеристик в сравнении двухкомпонентной структурой. Через 5 дней после синтеза коэффициент отражения на длине волны 11,4 нм упал до значения $R = 56,8 \%$. Однако измерение, проведенное

через 2 месяца на синхротроне BESSY II, показало хорошее соответствие с лабораторными измерениями, проведенными через 2 месяца после синтеза. Следовательно, можно сказать, что добавление барьерных слоев карбида бора позволило не только улучшить межслоевые границы, но и предотвратить деградацию отражательных характеристик со временем. При этом стоит отметить, что нанесение слоев B_4C на другую границу (sub/ B_4C /Sr/Ru структура) не позволило сформировать зеркало, обладающее стабильными отражательными характеристиками.

Следующим этапом исследований стал синтез МРЗ типа sub/Sr/ B_4C /Ru, оптимизированного на рабочую длину волны 9,34 нм. Результаты измерений, угловой зависимости коэффициента отражения на длине волны 9,34 нм представлены на рисунке 3.16. Измерения сразу после синтеза проводились на лабораторном рефлектометре, измерения через 2 месяца после синтеза проводились на синхротроне BESSY II.

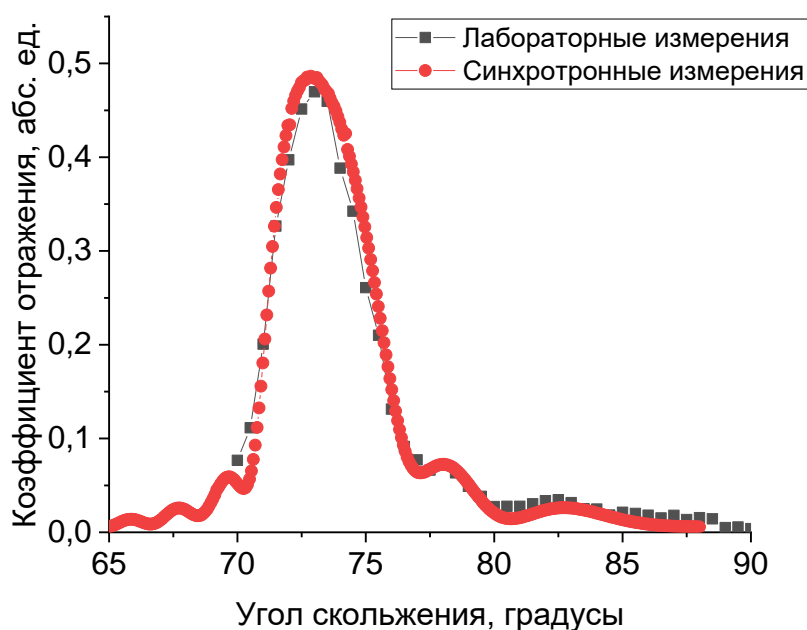


Рисунок 3.16 – Измерения угловых зависимостей коэффициента отражения многослойной структуры sub/Sr/ B_4C /Ru на рабочей длине волны 9,34 нм. Черная кривая соответствует лабораторному измерению, проведенному в день синтеза, красная кривая соответствует измерению, проведенному через 2 месяца после синтеза.

Из представленных данных видно, что структура обладает рекордным значением коэффициента отражения $R = 48,6 \%$ на длине волны $9,34 \text{ нм}$. При этом отсутствует временная деградация отражательных характеристик, что подтверждается хорошим совпадением лабораторных измерений, проведенных в день синтеза, и синхротронных измерений, проведенных через 2 месяца после синтеза.

Таким образом, в рамках проведенного исследования, были получены Ru/Sr структуры, обладающие коэффициентом отражения $R = 37 \%$ на длине волны $11,4 \text{ нм}$. Однако исследование временной стабильности отражательных характеристик показало, что спустя 2 недели после синтеза, коэффициент отражения структуры падает до величины порядка 1% , что делает невозможным ее практическое использование.

Показано, что существенного улучшения временной стабильности удалось достичь за счет внесения в структуру барьерных слоев B_4C . Были получены многослойные рентгеновские зеркала sub/Sr/ B_4C /Ru, которые обладали коэффициентом отражения $R = 62,3 \%$ на длине волны $11,4 \text{ нм}$. Повторные измерения угловой зависимости коэффициента отражения показали, что через 5 дней после синтеза коэффициент отражения падает до значения $R = 56,8 \%$. Однако измерения, проведенные через 2 месяца после синтеза на синхротроне, показали хорошее совпадение с лабораторными измерениями, что свидетельствует об отсутствии дальнейшей деградации отражательных характеристик.

В рамках проведенного исследования также были получены многослойные структуры sub/Sr/ B_4C /Ru, оптимизированные на длину волны $9,34 \text{ нм}$. Полученные значения коэффициента отражения данных структур составляют $R = 48,6\%$ и существенно превосходят известные на данный момент рекордные значения коэффициента отражения Pd/Y структур ($R = 43 \%$), оптимизированных на данную длину волны. Таким образом можно заключить, в рамках данной работы были получены многослойные зеркала, обладающие рекордным значением коэффициента отражения на длинах волн $9,34 \text{ нм}$ и $11,4 \text{ нм}$, что демонстрирует перспективность использования многослойных структур на основе стронция для работы в спектральном диапазоне $9\text{-}12 \text{ нм}$.

3.4 Основные результаты главы 3

- 1) Исследованы структурные параметры Ru/Y МРЗ. Установлено, что ширина переходной области Y-на-Ru составляет 0,2 нм, а Ru-на-Y – 1,3 нм.
- 2) Нанесение прослоек карбида бора на более протяженную границу Ru-на-Y уменьшает ее величину с 1,3 нм до 0,6 нм. Коэффициент отражения при этом увеличивается с 29% до 38,5% для зеркал нормального падения, оптимизированных на рабочую длину волны 9,34 нм.
- 3) Зеркала Ru/Y с барьерными слоями В4С обладают лучшей селективностью (1,7%), чем зеркала Pd/Y с барьерными слоями В4С (2,1%)
- 4) Нанесение барьерных слоев карбида бора на границу Ru-на-Sr уменьшает ее величину с 1 до 0,6 нм. Коэффициент отражения Ru/Sr/В4С зеркал $R = 62,3\%$ на длине волны 11,4 нм сразу после синтеза. Через 5 дней значение коэффициента отражения составило $R = 56,8\%$, однако дальнейшей деградации отражательных характеристик не наблюдалось в течение 2 месяцев.
- 5) Для Ru/Sr МРЗ с барьерными слоями карбида бора был получен коэффициент отражения $R = 48,6\%$ на длине волны 9,34 нм. Полученное значение коэффициента отражения оставалось стабильным в течение 2 месяцев.

Глава 4. Короткопериодные многослойные зеркала Mo/V₄C

В рамках данной главы приводятся результаты исследования зависимости коэффициента отражения R , спектральной селективности $\Delta\lambda/\lambda$ в жестком рентгеновском диапазоне и внутренних напряжений S для МРЗ Mo/V₄C, а также влияния высокотемпературного отжига на указанные характеристики.

4.1 Короткопериодные многослойные зеркала для диапазона жесткого рентгеновского излучения

Еще одним важным приложением многослойных рентгеновских зеркал являются системы монохроматизации на станциях синхротронного излучения [17-22]. Одним из аспектов, который необходимо учитывать при разработке отражательных элементов для данных монохроматоров, является возможность перехвата зеркалом как можно большей части пучка синхротронного излучения. Для решения данной задачи есть два пути решения. Первый – увеличение линейных размеров зеркала (рисунок 4.1 а). Однако это решение не является оптимальным, так с технологической точки зрения в силу сложности изготовления таких зеркал и увеличения aberrаций в оптической системе. Другое решение – увеличение рабочих углов скольжения (рисунок 4.1 б), что, в соответствии с условием Брэгга-Вульфа, приводит к необходимости уменьшения периода МРЗ.

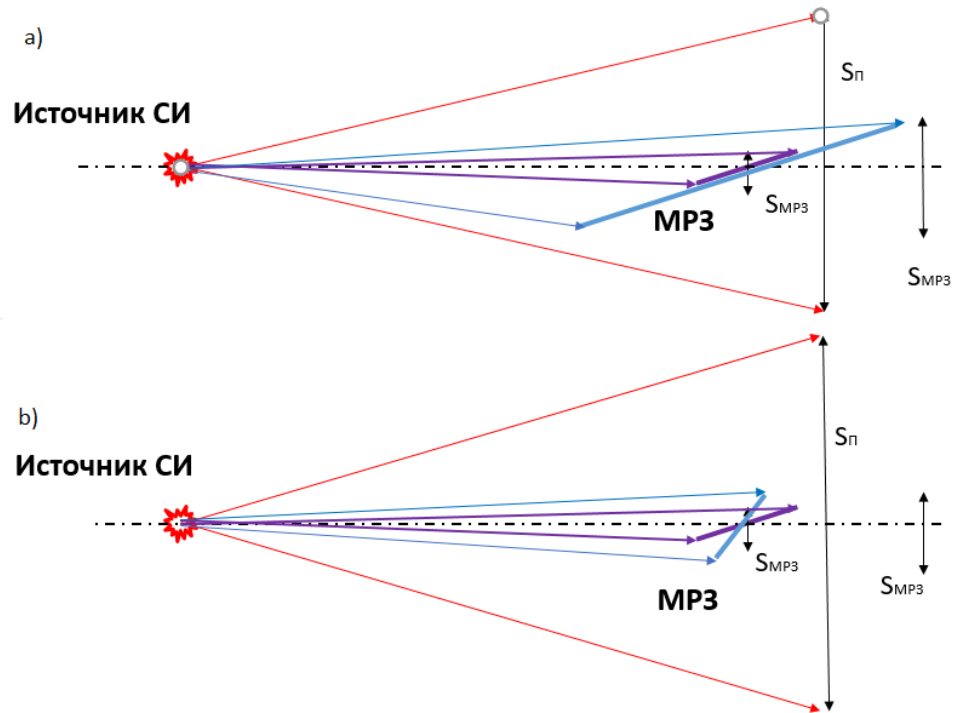


Рисунок 4.1. Схема падения синхротронного излучения на МРЗ. Красными линиями обозначен весь пучок синхротронного излучения, фиолетовыми – часть пучка, которая перехватывается изначально, синими – часть пучка, которая перехватывается за счет увеличения линейных размеров зеркала (а) и увеличения рабочих углов (b). $S_{\text{п}}$ – площадь пучка, $S_{\text{MPЗ}}$ – площадь зеркала.

Другой аспект связан с увеличением энергии фотонов, доступных на синхротронах последнего поколения. Уменьшение длины волны синхротронного излучения требует уменьшения периодов МРЗ. Исходя из этого актуальной задачей является поиск новых и дополнительные исследования уже известных типов многослойных зеркал с короткими и ультракороткими периодами.

Хорошей парой материалов для создания на их основе рентгеновских зеркал, оптимизированных на работу в жестком рентгеновском диапазоне, является вольфрам и карбид бора. Данные материалы обладают высоким оптическим контрастом, а также низкой химической активностью, в результате чего в W/B₄C зеркалах отсутствуют протяженные переходные границы, что особенно важно для короткопериодных структур. В работе [79] были получены значения коэффициента отражения $R = 1,3\%$ и $R = 0,08\%$ при энергиях излучения 516 эВ (2,4 нм) и 775 эВ (1,6 нм) и угле скольжения 87,5 градусов для структур с периодами $d = 1,19$ нм и

0,802 нм соответственно. В работе [80] были синтезированы структуры с периодами $d = 1,23$ и $1,51$ нм, обладающие значениями коэффициента отражения $R = 4 - 15\%$ и $R = 9 - 32\%$ в диапазоне энергий $1700 - 5400$ эВ ($0,23 - 0,73$ нм). В работе [81] были получены W/V₄C структуры, обладающие значениями коэффициента отражения $R = 10\%$ при угле скольжения $12,07$ градусов и периоде структуры $d = 1,98$ нм и $R = 4,5\%$ на 15 градусах и периоде $d = 1,62$ нм при энергии падающего излучения 1489 эВ.

В работе [82] был получен коэффициент отражения $R = 79,6\%$ для W/V₄C структуры с периодом $d = 3,55$ нм на длине волны $0,154$ нм. В работе [83] были синтезированы W/V₄C многослойные зеркала с периодом $d = 2,05$ нм с коэффициентами отражения $R = 53\%$ при энергии падающего излучения $8,047$ кэВ. В работе [84] были получены W/V₄C зеркала с периодом $d = 1,48$ нм, имеющие коэффициент отражения $R = 58,5\%$ и спектральную селективность $0,5\%$. В работе [85] изучались структуры W/V₄C с прослойками Cr. В [31] коэффициенты отражения МРЗ с периодом $1,31$ нм в диапазоне длин волн $0,834-1,76$ нм приблизились к отражению от монокристалла RbAP и составили $8,2-2\%$, и $>45\%$ на длине волны $0,154$ нм.

Недостатком этих зеркал является невысокая спектральная селективность, резкий рост межслоевой шероховатости, обусловленный потерей сплошности пленок W при периодах менее $1,3$ нм [24], а также наличие края поглощения W в области 10 кэВ, в результате чего наблюдается снижение коэффициента отражения для больших энергий. Следовательно, возникает задача поиска альтернативных пар материалов для синтеза короткопериодных структур.

Теоретический расчет показывает (рисунок 4.2 и рисунок 4.3), что перспективной парой материалов для данной задачи является Mo/V₄C. Расчет проведен для зеркал с периодами $d = 3,7$ нм, долей тяжелого материала в периоде (W и Mo, соответственно) $\beta = 0,45$, числом периодов $N = 120$.

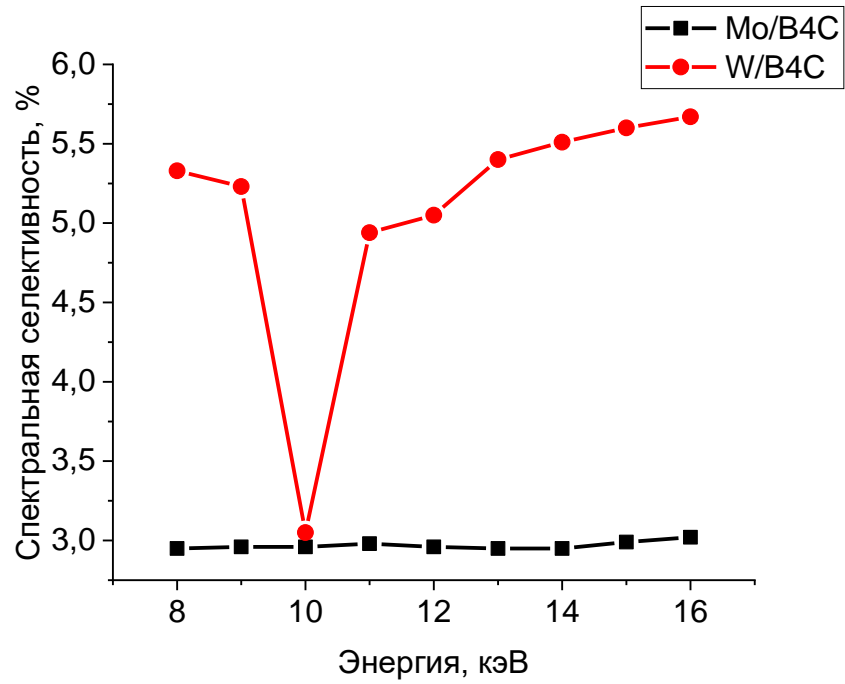


Рисунок 4.2 – Теоретической расчет спектральной селективности идеальных Mo/B₄C и W/B₄C зеркал в диапазоне энергий 8 – 14 кэВ.

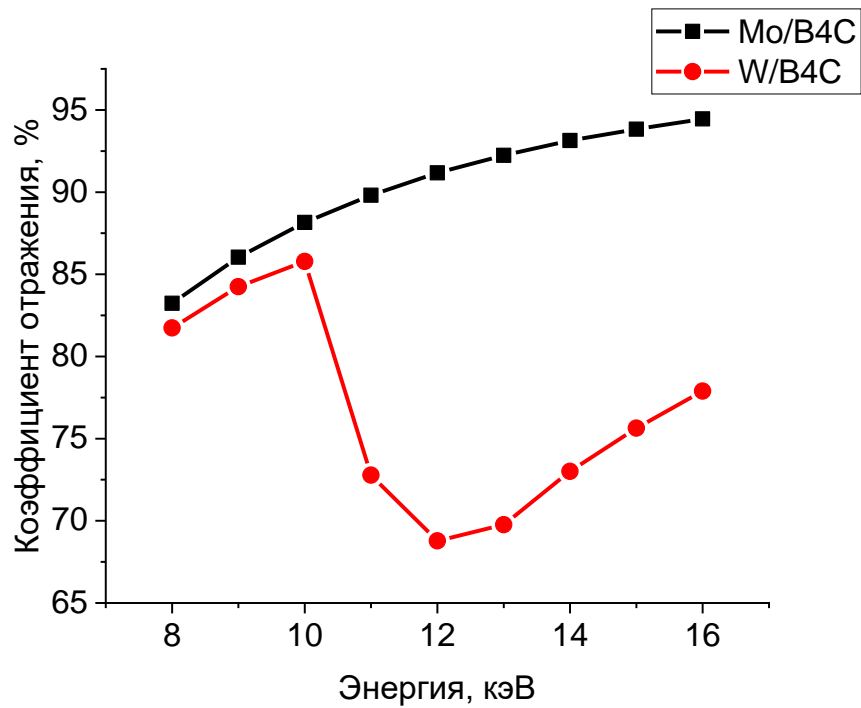


Рисунок 4.3 – Теоретической расчет коэффициентов отражения идеальных Mo/B₄C и W/B₄C зеркал в диапазоне энергий 8 – 14 кэВ.

Из представленных выше зависимостей видно, что Mo/W₄C многослойные зеркала обеспечивают лучшую спектральную селективность (~ 3 %) в диапазоне энергий излучения 8-14 кэВ, чем зеркала на основе W (~ 5 %). Это обусловлено тем фактом, что Mo имеет меньшее поглощение, чем W в данном диапазоне энергий, следовательно, излучение проникает в Mo/W₄C структуры на большую глубину, чем в W/W₄C структуры. Таким образом, число эффективно работающих слоев будет выше для Mo-содержащих зеркал, а, следовательно, они обеспечивают лучшую спектральную селективность, чем W-содержащие зеркала. Также для Mo/W₄C зеркал не наблюдается снижение коэффициента отражения во всем рассматриваемом диапазоне энергий в силу отсутствия в нем краев поглощения молибдена. При этом существуют возможности для увеличения спектральной селективности до величины лучше 1 % за счет уменьшения периода. Теоретический расчет показывает, что Mo/W₄C зеркала с периодом $d = 1,5$ нм обладают величиной спектральной селективности 0,9 % при энергии излучения 8 кэВ.

В работах [86-91] были изучены отражательные характеристики Mo/W₄C многослойных рентгеновских зеркал в мягком рентгеновском диапазоне длин волн, а также приводятся данные о термической стабильности структур при температурах до 600 градусов. В синхротронных исследованиях Mo/W₄C МРЗ применялись для монохроматизации рентгеновского излучения в диапазоне энергий фотонов 6-15 кэВ [92]. Однако из-за достаточно большего периода, более 3 нм, спектральная селективность зеркал была хуже 1%.

Вопрос об изучении структурных параметров короткопериодных Mo/W₄C зеркал, таких как величины переходных областей и шероховатости слоев, остается открытым. Также возникает задача исследования структур с минимально возможной величиной периода, при которой они могут быть использованы в качестве зеркал в оптических схемах. Mo/W₄C МРЗ с ультракороткими периодами изучены недостаточно. В частности, следует отметить работу [93], где изучались отражательные характеристики Mo/W₄C МРЗ с ультракороткими периодами 1,22-2,09 нм в мягком рентгеновском диапазоне. При периоде $d=1,22$ нм на длине волны 0,834 нм был получен коэффициент отражения 1,95%. Однако, коэффициенты отражения в жестком рентгеновском диапазоне достаточно подробно не изучались.

Так же не исследовалось внутреннее строение и возможности еще большего уменьшения периода. На станциях синхротронного излучения зеркала подвергаются термическим нагрузкам, что приводит к необходимости изучения их термической стабильности. При этом остается открытым вопрос об изменении внутренних напряжений зеркал при оказании на них теплового воздействия.

4.2. Структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ Мо/В₄С для монохроматизации излучения с энергиями 8-14 кэВ

Синтез многослойных Мо/В₄С структур осуществлялся методом магнетронного напыления на установке, описанной в главе 2. Перед технологическим процессом давление остаточных газов в камере находилось на уровне 10^{-7} мбар. В качестве рабочего газа использовался высокочистый (99,998%) аргон, рабочее давление которого составляло $9 \cdot 10^{-4}$ мбар. Питание магнетронов обеспечивалось источниками стабилизированного тока, разработанными в ИФМ РАН. На протяжении технологического процесса напряжения составляли 296 В для Мо и 267 В для В₄С, токи 200 мА для Мо и 1200 мА для В₄С. Соответственно, скорости роста пленок: 0,18 нм/с для Мо и 0,56 нм/с для В₄С.

Измерения зависимостей коэффициентов отражения и рассеяния от угла скольжения излучения на длине волны 0,154 нм проводились с использованием лабораторного высокоразрешающего четырех-кристального дифрактометра PANalytical X'Pert Pro. Аналогичные измерения были проведены на станции «ФАЗА» Курчатовского специализированного источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» [35]. Рабочий диапазон энергий излучения данной станции составляет 3,5 – 50 кэВ. Станция оснащена двухкристальным монохроматором, обеспечивающим энергетическое разрешение $\Delta E/E = 5 \cdot 10^{-4}$. Измерения на длинах волн 1,759 нм (Fe L α) и 0,989 нм (Mg K α) проводились на лабораторном рефлектометре с решеточным спектрометром-монохроматором скользящего падения. На рисунке 4.4 представлен пример сравнения лабораторных и синхротронных кривых зеркального отражения. Из представленных данных можно сделать вывод о хорошем соответствии измерений. Также использование синхротронного излучения позволяет расширить динамический диапазон измерений, что позволяет точнее восстановить структурные параметры зеркал.

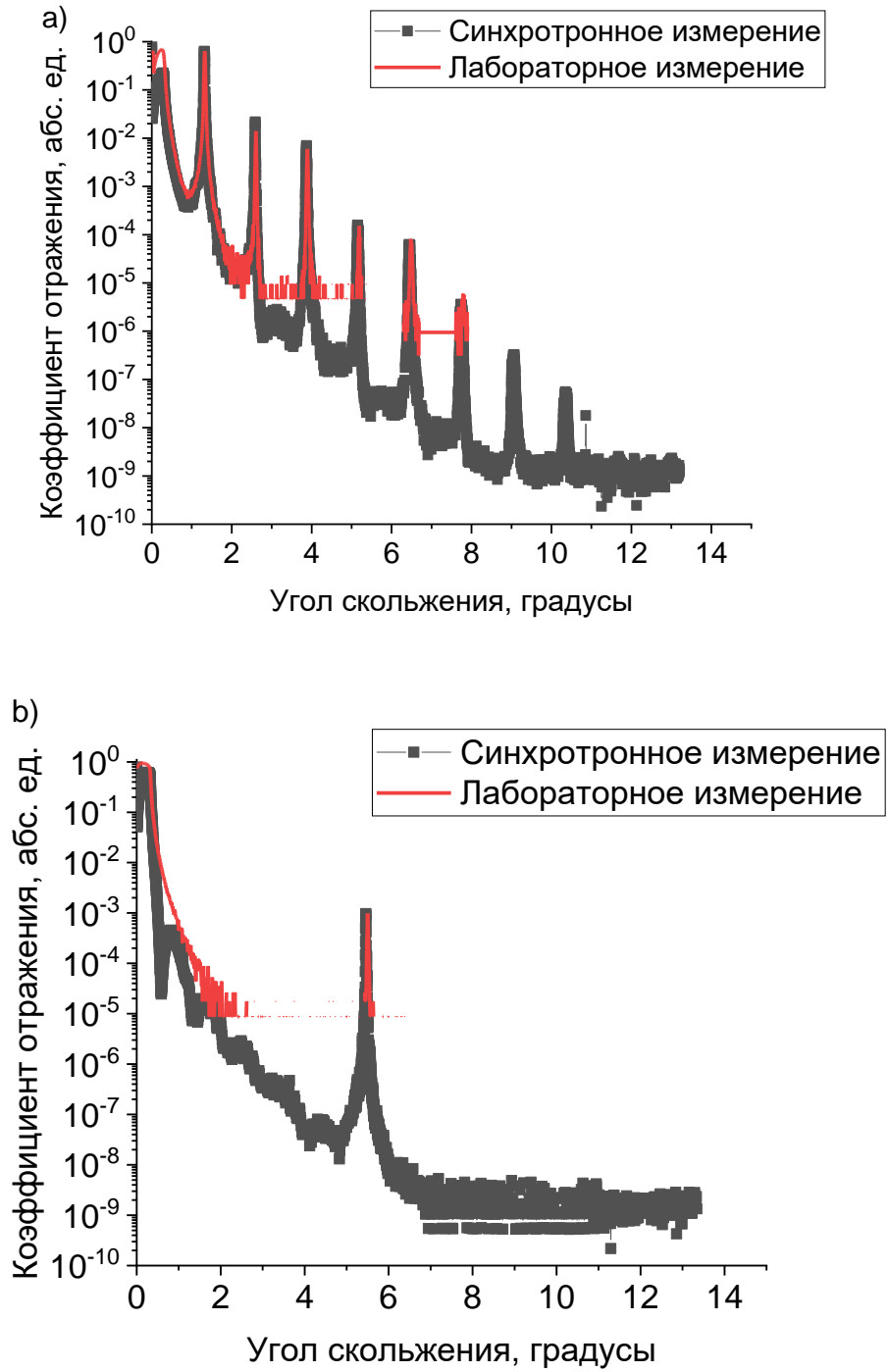
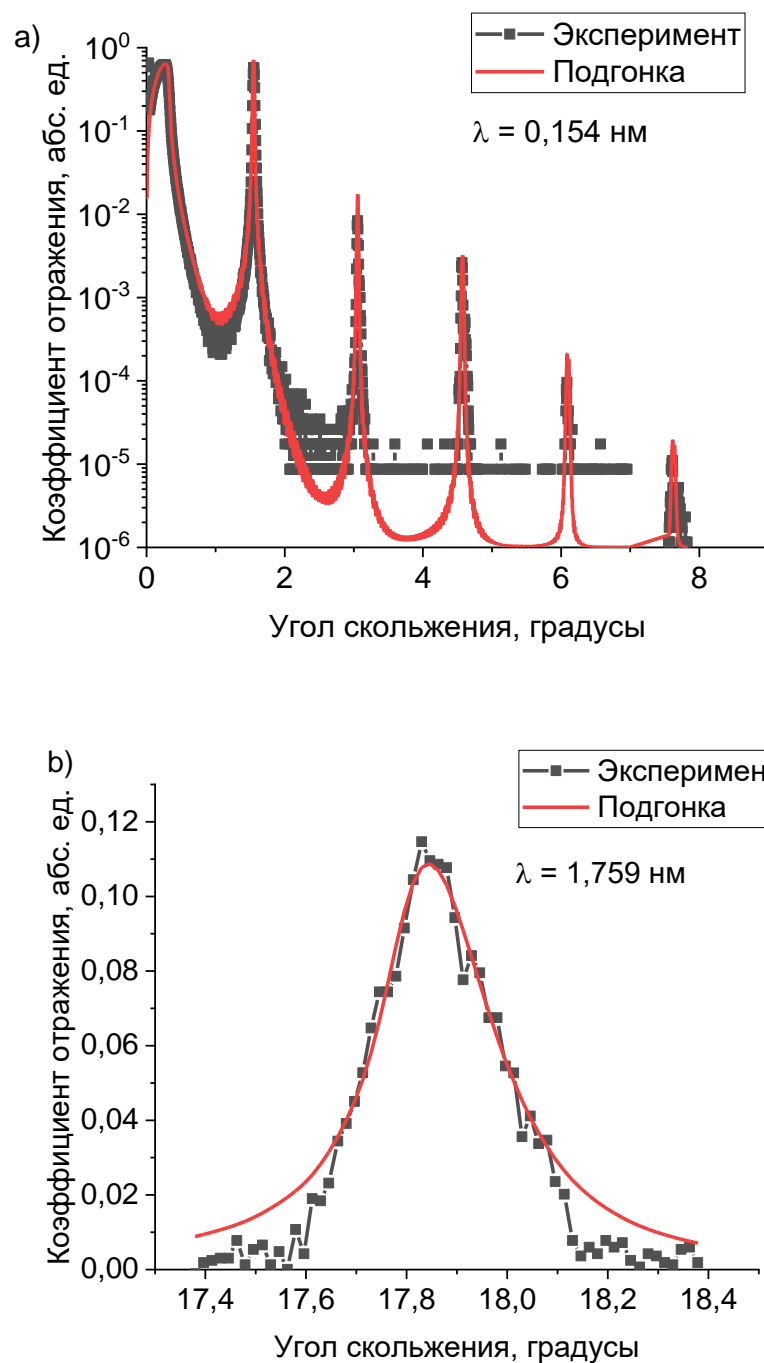


Рисунок 4.4 – Сравнение лабораторных (черные) и синхротронных (красные) кривых зеркального отражения, измеренных на длине волны 0,154 нм, для зеркал с периодом 3,42 нм (а) и 0,8 нм (б).

Структурные параметры образцов (период, толщины слоев, межслоевая шероховатость, профиль электронной плотности) определялись методом одновременной подгонки кривых отражения на длинах волн 0,154 нм, 0,989 нм и 1,759 нм в программе Multifitting. Величина спектральной селективности $\Delta\lambda/\lambda$ вычислялась по результатам обработки измерения угловой зависимости коэффициента отражения и построению на ее основе спектральной зависимости коэффициента отражения. На рисунке 4.5 приведен пример обработки кривых зеркального отражения и диффузного рассеяния для образца с периодом $d = 2,93$ нм.



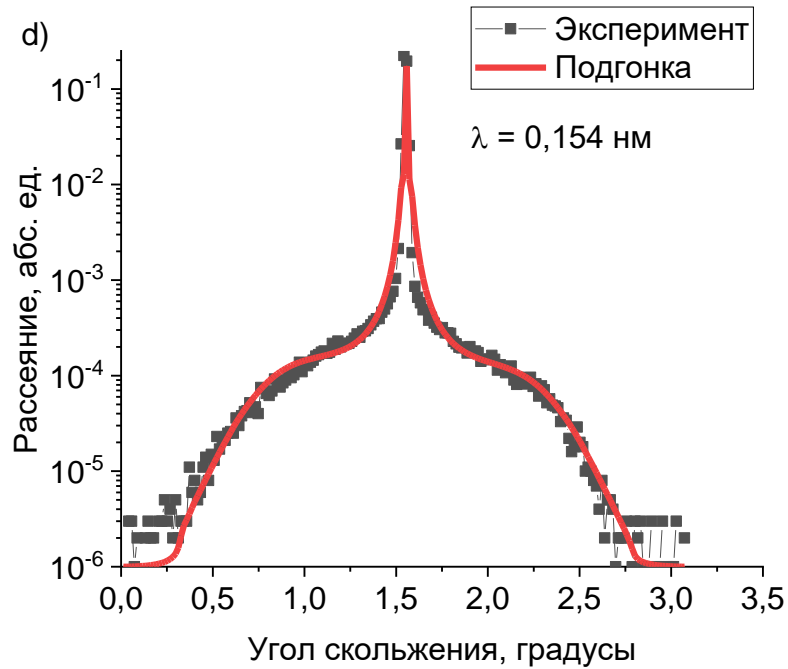
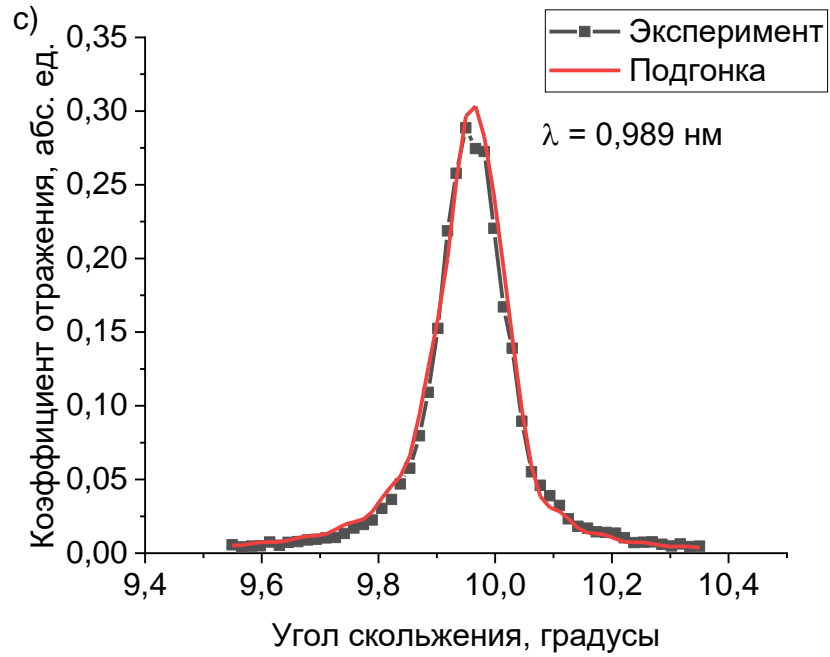


Рисунок 4.5 – Кривые зеркального отражения, измеренные на длинах волн 0,154 нм (а), 1,759 нм (б), 0,989 (с), и диффузного рассеяния (д), измеренная на длине волны 0,154 нм (д) и их подгонка. Черные кривые соответствуют измерениям, красные – подгонке.

На первом этапе экспериментов было исследованы структурные параметры и отражательные характеристики МРЗ Мо/В₄С с периодами в диапазоне от 0,8 до 3,4

нм. Доля молибдена в периоде составляла 0,45 – 0,5, что обусловлено невозможностью формирования индивидуального слоя с толщиной меньше 0,4 нм. Структурные параметры и отражательные характеристики зеркал представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Структурные параметры синтезированных Мо/В₄С структур: d – период структуры в нм, R – коэффициент отражения в первом брэгговском пике на длине волны 0,154 нм в %, N – число периодов, S_{Мо} – ширина интерфейса В₄С-на-Мо в нм, S_{В₄С} – ширина интерфейса Мо-на-В₄С в нм, $\Delta\lambda/\lambda$ – спектральная селективность в первом брэгговском пике в %.

Название образца	d, нм	R, %	N	s _{В₄С} , А	s _{Мо} , А	σ, А	$\Delta\lambda/\lambda$, %
RS-151	3,42	63,3	115	0,27	0,19	0,05	3
RS-154	2,93	57,8	135	0,29	0,18	0,09	1,7
RS-157	2,41	44,5	162	0,32	0,18	0,09	1,6
RS-168	1,81	40	220	0,34	0,25	0,083	0,7
RS-210	1,61	19,5	250	0,4	0,2	0,084	1
RS-211	1,38	10,1	285	0,38	0,25	0,052	0,9
RS-212	1,2	4	335	0,38	0,2	0,115	0,8
RS-213	1,0	0,5	400	0,38	0,21	0,103	0,5
RS-217	8	0,1	500	0,42	0,27	0,112	0,4

Интерфейсы формируются за счет нескольких механизмов, основными из которых являются ростовая шероховатость и взаимное перемешивание материалов, обусловленное, прежде всего баллистическим эффектом внедрения атомов с высокими энергиями (единицы-десятки эВ) поступающего на пленку конденсата, а также диффузией, усиленной химическим взаимодействием. Варьируя параметры технологического процесса роста МРЗ можно влиять на тот или иной механизм формирования интерфейсов. Поэтому для оптимизации процессов роста МРЗ важно разделять вклады ростовой шероховатости и перемешивания материалов в суммарную ширину интерфейса. Так, в случае преобладания в структуре шероховатости имеет смысл применять методики ионной полировки слоев [33]. В тоже время в случае преобладания процессов диффузии эффективным способом ее уменьшения является использование барьерных слоев и оптимизация энергии атомов поступающего на подложку конденсата [34].

Для разделения вкладов указанных выше эффектов применялся метод измерения кривых диффузного рассеяния рентгеновского излучения, так как за рассеяние ответственны именно межслоевые шероховатости, в то время как перемешивание приводит лишь к незначительному падению интенсивности рассеянного излучения за счет уменьшения скачка электронной плотности на границах. На рисунке 4.6 приведены восстановленные профили электронной плотности. Зависимость ширины интерфейсов и геометрической шероховатости от периода структуры приведены на рисунке.4.7.

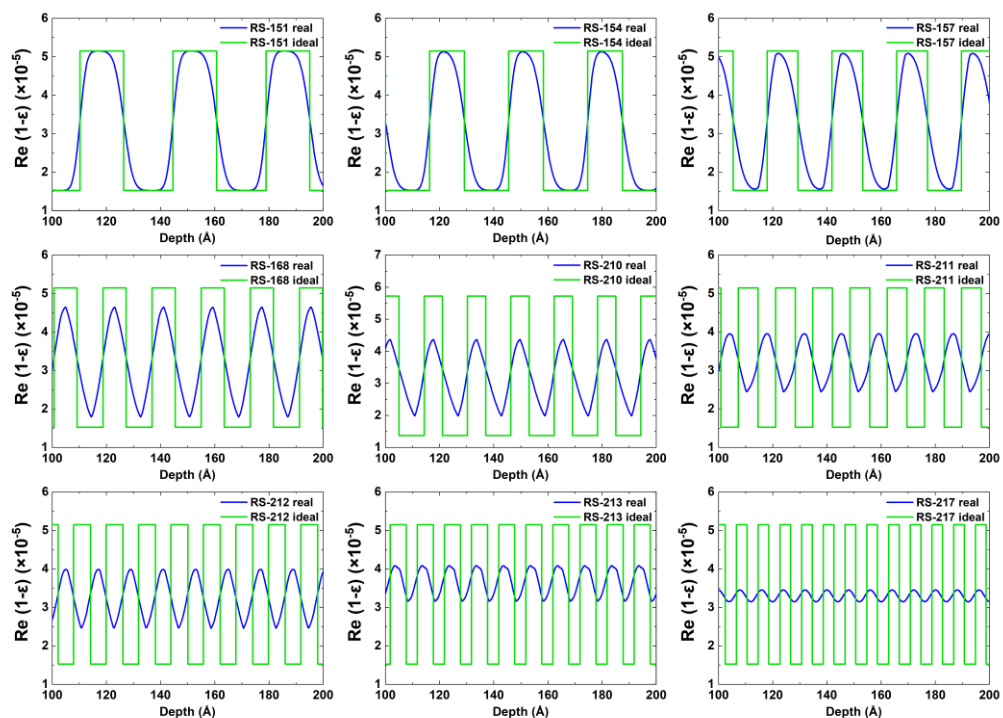


Рисунок 4.6 – Профили электронной плотности образцов RS-151 – RS-217, восстановленные по данным рентгеновского отражения. Синяя кривая соответствует распределению электронной плотности вглубь структуры с учетом интерфейсов, зеленая соответствует случаю идеальной структуры с нулевыми интерфейсами.

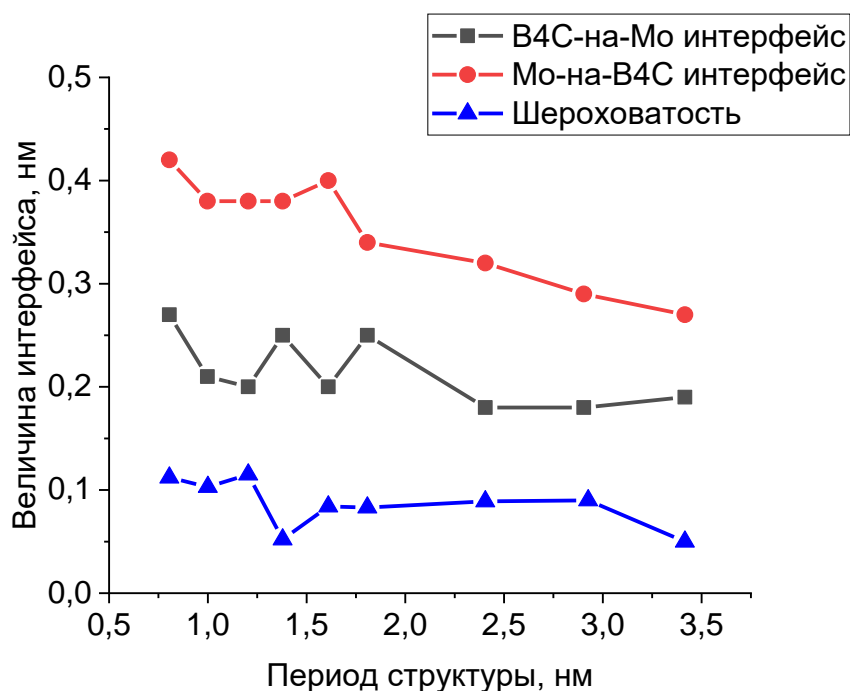


Рисунок 4.7 – Зависимость величины интерфейсов Мо-на-В₄С (красная кривая с кругами), В₄С-на-Мо (черная кривая с квадратами) и межслоевой шероховатости (синяя кривая с треугольниками) от периода структуры.

Исходя из представленных данных можно сделать несколько выводов. Во-первых, значение межслоевой шероховатости остается практически неизменным для всех структур и имеет значение меньше 0,1 нм с небольшой тенденцией к увеличению при уменьшении периода до 1,2 нм. Во-вторых, основной вклад в ширины интерфейсов вносит перемешивание материалов пленок на границах. При этом граница Мо-на-В₄С более размыта. С уменьшением периода ширина переходных областей также имеет тенденцию слабого роста от 0,19 нм до 0,27 нм на границе В₄С-на-Мо и с 0,27 нм до 0,42 нм на Мо-на-В₄С границе. В-третьих, даже для структур с периодами 0,8 нм на кривой зеркального отражения наблюдался четкий брэгговский пик, что свидетельствует о том, что структура может быть использована в качестве зеркала в оптических схемах. В-пятых, для зеркал с периодами меньше 1,6 нм спектральная селективность имеет величину меньше 1%, что удовлетворяет большинству требований по монохроматизации синхротронного излучения. Следовательно, короткопериодные Мо/В₄С зеркала являются хорошей альтернативой W/В₄С зеркалам для синхротронных приложений.

4.3 Исследование термической стабильности и внутренних напряжений МРЗ Мо/В₄С

Для исследования термической стабильности Мо/В₄С зеркал были синтезированы образцы с периодами около 3,8 нм (3,74 – 3,84 нм) с различными значениями толщины молибдена в периоде, которые подвергались вакуумному отжигу. Параметры зеркал до отжига приведены в таблице 4.2. Число периодов для всех образцов $N = 120$.

Таблица 4.2 – Параметры многослойных зеркал Мо/В₄С до отжига: период d , доля молибдена в периоде β , коэффициент отражения в первом брэгговском пике R в %, угловая ширина первого брэгговского пика $\Delta\vartheta$ в градусах, спектральная селективность $\Delta\lambda/\lambda$ при $\lambda=0,154$ нм в % и внутренние напряжения S в МПа.

Образец	d , нм	β	R , %	$\Delta\vartheta$	$\Delta\lambda/\lambda$, %	S , МПа
RS-193	3,74	0,45	62,5	0,039	3,2	-1280
RS-194	3,81	0,34	60,2	0,04	3,3	-1513
RS-197	3,75	0,26	58,6	0,037	3,1	-1623
RS-198	3,84	0,22	57,5	0,027	2,3	-1738
RS-207	3,79	0,17	57	0,02	1,68	-1813

Наименьшая полуширина первого брэгговского пика, как и ожидалось, достигается при наименьшем значении параметра $\beta = 0,17$. Спектральная селективность МРЗ $\Delta\lambda/\lambda = 1,68$ %. При этом значение коэффициента отражения составляет $R = 57\%$. Далее образцы подвергались отжигу в вакуумной печи при давлении $6 \cdot 10^{-7}$ мбар. Температура контролировалась термопарой хромель-алюмель с точностью ± 5 °С. Образцы отжигались при температуре 300 °С, которая соответствует тепловым нагрузкам на станциях синхротронного излучения. Время одного цикла отжига составило 1 час. На рисунке 4.8 приведена временная зависимость температуры образца от времени для нагрева до 300 °С. Структурные параметры образцов после отжига приведены в таблице 4.3. На рисунке 4.9 и

рисунке 4.10 приведена зависимость коэффициента отражения и спектральной селективности от доли молибдена в периоде до отжига и после отжига зеркал.

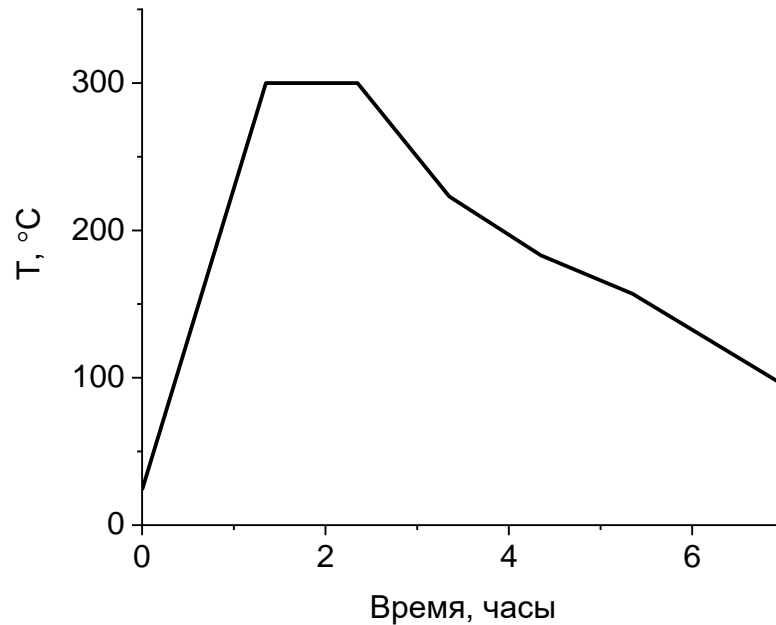


Рисунок 4.8 – Временная зависимость температуры образца от времени при отжиге (нагрев до 300 °C).

Таблица 4.3 – Параметры МРЗ Мо/В₄С после отжига: период d , доля молибдена в периоде β , коэффициент отражения в первом брэгговском пике R в %, угловая ширина первого брэгговского пика $\Delta\theta$ в градусах, спектральная селективность $\Delta\lambda/\lambda$ при $\lambda=0,154$ нм в % и внутренние напряжения S в МПа.

Образец	d , нм	β	R , %	$\Delta\theta$	$\Delta\lambda/\lambda$, %	S , МПа
RS-193	3,74	0,45	60,5	0,04	3,4	-395
RS-194	3,81	0,34	61,1	0,04	3,3	-721
RS-197	3,75	0,26	57,5	0,038	3,2	-854
RS-198	3,84	0,22	57,5	0,026	2,2	-1136
RS-207	3,79	0,17	50	0,026	2,2	-1249

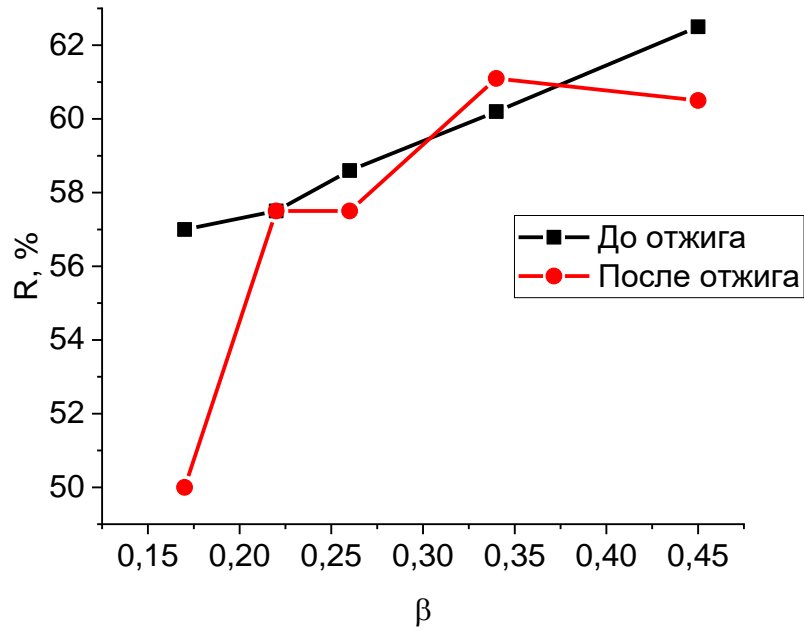


Рисунок 4.9 – Зависимость коэффициента отражения Mo/V₄C зеркал от доли молибдена в периоде до отжига зеркал (черная кривая) и после отжига (красная кривая).

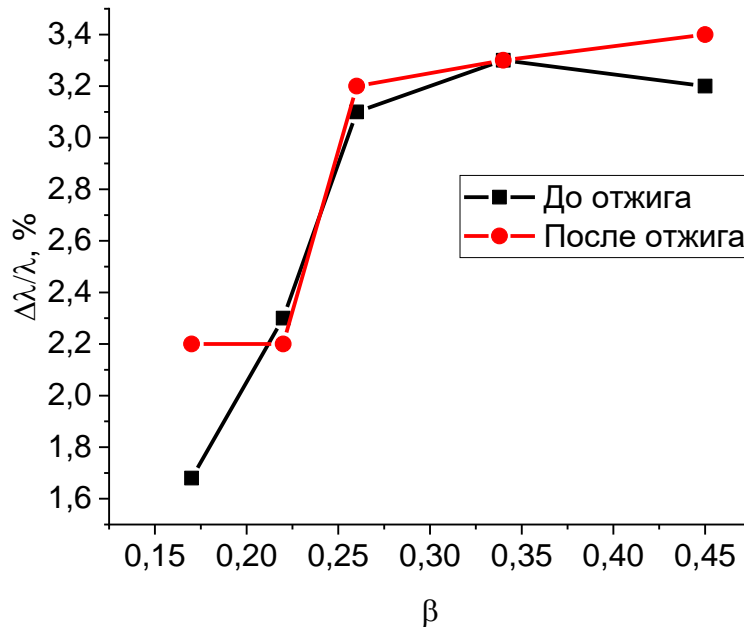


Рисунок 4.10 – Зависимость спектральной селективности Mo/V₄C зеркал от доли молибдена в периоде до отжига зеркал (черная кривая) и после отжига (красная кривая).

Из представленных данных следует, что отражательные характеристики образцов со значениями параметра β в диапазоне 0,22 – 0,45 после отжига изменяются незначительно. Их вариации соответствуют погрешности измерений. В то же время образец с самым тонким слоем молибдена демонстрирует, действительно, заметное ухудшение: R уменьшился с 57% до 50%, $\Delta\lambda/\lambda$ увеличилась с 1,68% до 2,2%, величина интерфейса В4С-на-Мо увеличилась с 0,22 нм до 0,31 нм. Также при отжиге существенно уменьшается величина сжимающих напряжений в многослойных зеркалах Мо/В4С (рисунок 4.11).

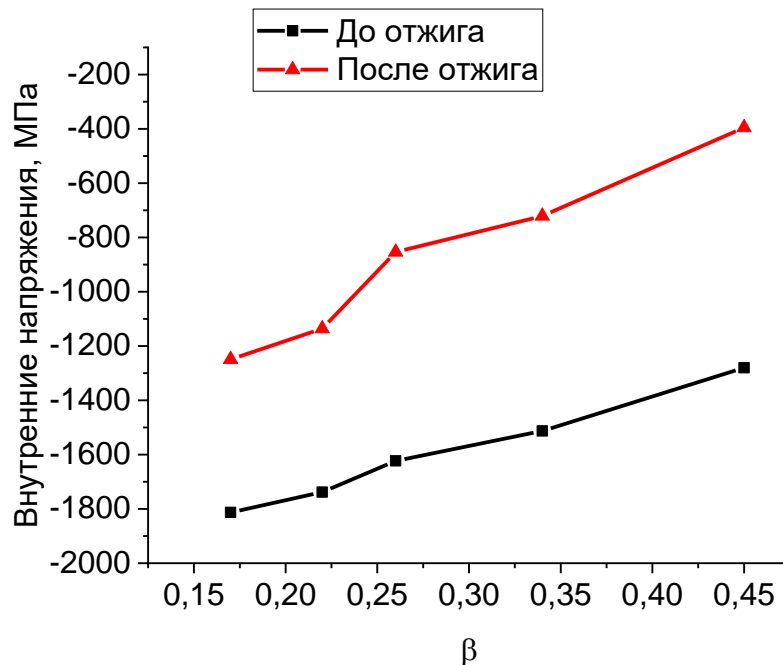


Рисунок 4.11 – Величины внутренних напряжений в зависимости от параметра β для Мо/В4С до (черная кривая с квадратными символами) и после (красная кривая с треугольными символами) отжига в течение 1 часа при температуре 300°C.

На рисунок 4.12 приведена зависимость внутренних напряжений для образца RS-193 ($\beta = 0,45$) от времени отжига: 1, 2 и 3 часа. Этот образец последовательно подвергался нескольким отжигам продолжительностью по 1 часу (режим каждой итерации как на рисунке 4.8). После каждой операции отжига образец остужался, извлекался из вакуумной печи и проходил процедуру измерений внутренних напряжений.

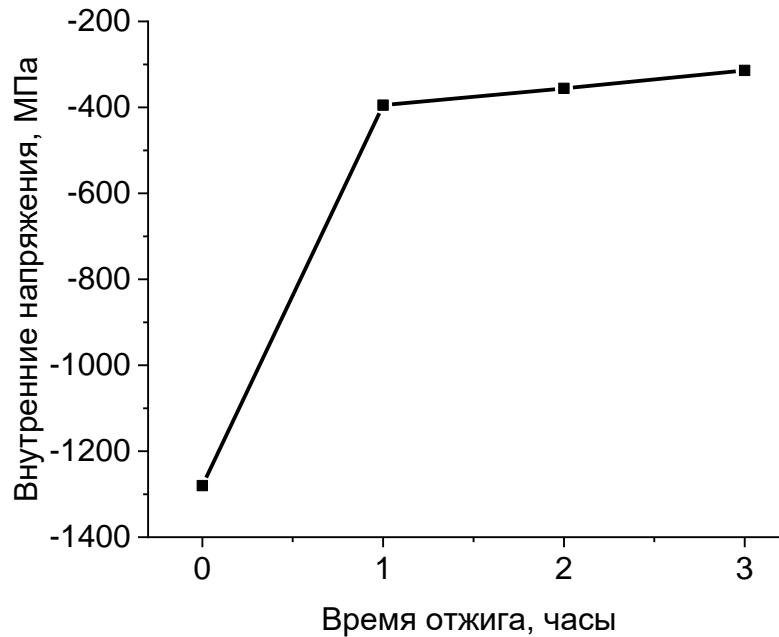


Рисунок 4.12 – Зависимость внутренних напряжений в структуре Мо/В₄С с параметром $\beta = 0,45$ от времени отжига.

Если после первого часа отжига наблюдается значительное снижение величины внутренних напряжений с -1280 МПа до -395 МПа, то дальнейшее повторение процедуры не позволило существенным образом снизить это значение. После второго и третьего отжига значение внутренних напряжений составляли -356 МПа и -314 МПа соответственно. Тем не менее, снижение величины внутренних напряжений без потери в отражательной способности является положительным свойством МРЗ Мо/В₄С.

4.4 Основные результаты главы 4

В рамках данной главы представлены результаты исследования Mo/V₄C многослойных структур. Основными результатами являются следующие:

- 1) Определены структурные параметры Mo/V₄C зеркал с периодами от $d = 3,4$ нм до $d = 0,8$ нм. Показано, что даже для зеркал с ультракороткими периодами на кривых отражения в жестком рентгеновском диапазоне длин волн наблюдаются четкие Брэгговские пики, что свидетельствует о возможности их использования в качестве отражательных элементов в оптических схемах. Установлено, что межслоевая шероховатость остается постоянной при изменении периода зеркал с тенденцией слабого роста для зеркал с периодами, короче 1,2 нм. При этом с уменьшением периода ширина переходных областей также имеет тенденцию слабого роста от 0,19 нм до 0,27 нм на границе V₄C-на-Mo и с 0,27 нм до 0,42 нм на Mo-на-V₄C границе.
- 2) Показано, что Mo/V₄C зеркала обладают хорошей температурной стабильностью. Отжиг зеркал при температуре 300 градусов не привел к деградации отражательных характеристик.
- 3) Исследована зависимость внутренних напряжений в Mo/V₄C МРЗ от доли молибдена в периоде. Показано, что при уменьшении параметра β от 0,45 до 0,17 внутренние напряжения изменяются от -395 МПа до -1249 МПа. При этом отжиг структур приводит к существенному уменьшению абсолютной величины внутренних напряжений для любой доли молибдена в периоде. Также показано, что данный эффект наблюдается после часа отжига. Дальнейшее увеличение времени отжига не приводит к уменьшению внутренних напряжений.

Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению структурных параметров и отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе С, В, Y, Sr, а также развитию методик управления межслоевыми границами. В ходе работы были получены следующие результаты:

- 1) Величина межслоевых интерфейсов для Cr/C зеркал слабо зависит от периода для значений периода больше 3 нм. При этом для каждого значения периода наблюдается асимметрия межслоевых границ: граница Cr-на-С является более протяженной, чем граница С-на-Cr. Синтез зеркал Cr/C в смеси газов «аргон + азот» не позволил увеличить коэффициент отражения. Пассивация слоев углерода позволила уменьшить величину переходной области на границе Cr-на-С с 0,51 нм до 0,39 нм, что позволило получить рекордное значение для коэффициента отражения Cr/C зеркал нормального падения на длине волны $\lambda = 4,47$ нм: $R = 20,2$ %. Пассивация слоев хрома не привела к улучшению границы С-на-Cr.
- 2) Многослойные зеркала Ru/V₄C обладают низкими значениями ширины переходных областей на уровне 0,2 нм для любой величины доли рутения в периоде, что позволило получить значения коэффициентов отражения близкие к предельным на длине волны 9,34 нм. Показано, что данные зеркала эффективно перекрывают весь диапазон 6,6 – 9 нм.
- 3) В многослойных зеркалах Ru/V граница В-на-Ru является более протяженной (0,69 нм), чем граница Ru-на-В (0,21 нм). Нанесение слоев углерода с толщиной 0,33 нм на протяженную границу позволяет уменьшить величину переходной области до 0,37 нм.
- 4) Исследованы структурные параметры Ru/Y МРЗ. Установлено, что ширина переходной области Y-на-Ru составляет 0,2 нм, а Ru-на-Y – 1,3 нм. Нанесение прослоек карбида бора на более протяженную границу Ru-на-Y уменьшает ее величину с 1,3 нм до 0,6 нм. Коэффициент отражения при этом увеличивается с 29% до 38,5% для зеркал нормального падения, оптимизированных на рабочую длину волны 9,34 нм. Зеркала Ru/Y с

барьерными слоями В4С обладают лучшей селективностью (1,7%), чем зеркала Pd/Y с барьерными слоями В4С (2,1%).

- 5) Нанесение барьерных слоев карбида бора на границу Ru-на-Sr уменьшает ее величину с 1 до 0,6 нм. Коэффициент отражения Ru/Sr/В4С зеркал $R = 62,3\%$ на длине волны 11,4 нм сразу после синтеза. Через 5 дней значение коэффициента отражения составило $R = 56,8\%$, однако дальнейшей деградации отражательных характеристик не наблюдалось в течение 2 месяцев. Для Ru/Sr МРЗ с барьерными слоями карбида бора был получен коэффициент отражения $R = 48,6\%$ на длине волны 9,34 нм. Полученное значение коэффициента отражения оставалось стабильным в течение 2 месяцев.
- б) Определены структурные параметры Мо/В4С зеркал с периодами от $d = 3,4$ нм до $d = 0,8$ нм. Показано, что даже для зеркал с ультракороткими периодами на кривых отражения в жестком рентгеновском диапазоне длин волн наблюдаются четкие Брэгговские пики, что свидетельствует о возможности их использования в качестве отражательных элементов в оптических схемах. Установлено, что межслоевая шероховатость остается постоянной при изменении периода зеркал с тенденцией слабого роста для зеркал с периодами, короче 1,2 нм. При этом с уменьшением периода ширина переходных областей также имеет тенденцию слабого роста от 0,19 нм до 0,27 нм на границе В4С-на-Мо и с 0,27 нм до 0,42 нм на Мо-на-В4С границе.
- 7) Показано, что Мо/В4С зеркала обладают хорошей температурной стабильностью. Отжиг зеркал при температуре 300 градусов не привел к деградации отражательных характеристик. Исследована зависимость внутренних напряжений в Мо/В4С МРЗ от доли молибдена в периоде. Показано, что при уменьшении параметра β от 0,45 до 0,17 внутренние напряжения изменяются от -395 МПа до -1249 МПа. При этом отжиг структур приводит к существенному уменьшению абсолютной величины внутренних напряжений для любой доли молибдена в периоде. Также показано, что данный эффект наблюдается после часа отжига. Дальнейшее

увеличение времени отжига не приводит к уменьшению внутренних напряжений.

Литература

1. Yakshin, A. E. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition / Yakshin A. E., van de Kruijs R. W. E., Nedelcu I., E. Zoethout, E. Louis, F. Bijkerk, H. Enkisch, S. Müllender // *Proc. SPIE.* – 2007. – Vol. 6517. – P. 65170I.
2. Yulin, S. A. EUV/soft x-ray multilayer optics / S. A. Yulin, T. Feigl, N. Benoit and N. Kaiser // *Proc. SPIE.* – 2005. – Vol. 5645. – P. 289.
3. Bajt, S. Molybdenum–ruthenium/beryllium multilayer coatings / S. Bajt // *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.* – 2000. – Vol. 18. – P. 557.
4. Chkhalo, N. I. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography / Nikolai I. Chkhalo, Sergei A. Gusev, Andrey N. Nechay, Dmitry E. Pariev, Vladimir N. Polkovnikov, Nikolai N. Salashchenko, Franz Schäfers, Mewael G. Sertsu, Andrey Sokolov, Mikhail V. Svechnikov, and Dmitry A. Tatarsky // *Optics Letters.* – 2017. – Vol. 42. – No. 24. – P. 5070-5073.
5. Martínez-Galarce, D. Multisegmented, multilayer-coated mirrors for the Solar Ultraviolet Imager / D. Martínez-Galarce, Regina Soufli, David L. Windt, Marilyn Bruner // *Opt. Eng.* – 2013. – Vol. 59. – No. 2. – P. 095102-1 – 095102-15.
6. Chkhalo, N. I. New Concept for the Development of High-Performance X-Ray Lithography / N. I. Chkhalo // *Russian Microelectronics.* – 2024. – Vol. 53. – No. 5. – P. 397–407.
7. Smertin, R. M. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors / R. M. Smertin, N. I. Chkhalo, M. N. Drozdov, S. A. Garakhin, S. Yu. Zuev, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, and P. A. Yunin // *Opt. Express.* – 2022. – Vol. 30. – No. 26. – P. 46749-46761.
8. Smertin, R. Stress, reflectance, and stability of Ru/Be multilayer coatings with Mo interlayers near the 11 nm wavelength / Ruslan Smertin, Nikolai Chkhalo, Sergey Garakhin, Vladimir Polkovnikov, and Sergey Zuev // *Opt. Lett.* – 2024. – Vol. 49. – No. 13. – P. 3690-3692.
9. Chkhalo, N. I. Conversion efficiency of a laser-plasma source based on a Xe jet in the vicinity of a wavelength of 11 nm / N. I. Chkhalo, S. A. Garakhin, A. Ya. Lopatin, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. N. Tsybin, and S. Yu. Zuev // *AIP Advances.* – 2018. – Vol. 8. – P. 105003.
10. Kalmykov, S.G. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11nm—Optimization and conversion efficiency / Kalmykov, S.G., Butorin, P.S., and Sasin, M.E. // *J. Appl. Phys.* – 2019. – Vol. 126. – No. 10. – p. 103301.
11. Nechay, A.N. Lasing efficiency of krypton ions in the (8 – 14)-nm band upon pulsed laser excitation / A.N. Nechay, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, V.N. Polkovnikov, D.G. Reunov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo, N.N. Tsybin // *Quantum Electronics.* – 2020. – Vol. 50. – No. 4. – P. 408 – 413.

12. Chkhalo, N. I. Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics / N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko // *AIP Advances*. – 2013. – Vol. 3. – No 8. – P. 082130.
13. Салащенко, Н. Н. Коротковолновая проекционная литография / Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало // *Вестник Российской Академии Наук*. – 2008. – Т. 78. – Вып. 5. – С. 13-20.
14. Wagner, Ch. Lithography gets extreme / Ch. Wagner, N. Harned // *Nature Photon*. – 2010. – Vol. 4. – No. 24. – P. 24 – 26.
15. Falcone, R. New directions in X-ray microscopy / R. Falcone, C. Jacobsen, J. Kirz, S. Marchesini, D. Shapiro, J. Spence // *Contemporary Physics*. – 2011. – Vol. 52. – No. 4. – P. 293.
16. Artyukov, I. A. X-ray microscopy in the carbon window region / I.A. Artyukov, A.V. Vinogradov, Yu.S. Kas'yanov, S.V. Savel'ev // *Quantum Electronics*. – 2004. – Vol. 34. – No. 8. – P. 691.
17. 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 Conf. Proc.* – 2020. – Vol. 2299. – P.060001.
18. Zuazo, R. A double crystal X-ray monochromator for the SpLine diffraction and absorption synchrotron bending magnet beamline at the ESRF / J. Rubio-Zuazo, Victor Collado-Negro, C. Heyman, Pilar Ferrer, Iván da Silva, J.A. Gallastegui, A. Gutiérrez-León and G.R. Castro // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – Vol. 425. – P. 052005.
19. Morawe, C. Multilayer based x-ray optics at the ESRF / C. Morawe, D. Carau, & J. C. Peffen // *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XII*. – 2017. – Vol. 10386. – P. 1038603.
20. Hayama, S. The scanning four-bounce monochromator for beamline I20 at the Diamond Light Source / S. Hayama, G. Duller, J. P. Sutter, M. Amboage, R. Boada, A. Freeman, L. Keenan, B. Nutter, L. Cahill, P. Leicester, B. Kemp, N. Rubies and S. Diaz-Moreno // *J. Synchrotron Rad.* – 2018. – Vol. 25. – P. 1556-1564.
21. Sawhney, K. J. S. A double multilayer monochromator for the B16 Test beamline at the Diamond Light Source / K. J. S. Sawhney, I. P. Dolbnya, S. M. Scott, M. K. Tiwari, G. M. Preece, S. G. Alcock, and A. W. Malandain // *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components VI Proc. SPIE 8139*. – 2011. – Vol. 8139. – P. 813908.
22. Chkhalo, N.I. / Project of a two-mirror monochromator for the photon energy range 8-36 keV for the "SKIF" synchrotron / Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Malyshev I.V., Polkovnikov V.N., Toropov M.N., Salashchenko N.N., Ulasevich B.A., Rakshun Ya.V., Chernov V.A., Dolbnya I.P., Raschenko S.V. // *Technical Physics*. – 2022. – Vol. 8. – P. 1075.

23. Leake, S. J. The Nanodiffraction beamline ID01/ESRF: a microscope for imaging strain and structure / S. J. Leake, G. A. Chahine, H. Djazouli, T. Zhou, C. Richter, J. Hilhorst, L. Petit, M.-I. Richard, C. Morawe, R. Barrett, L. Zhang, R. A. Homs-Regojo, V. Favre-Nicolin, P. Boesecke and T. U. Schüllli // *J. Synchrotron Rad.* – 2019. – Vol. 26. – P. 571-584.
24. Vainer, Yu.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, and N.I. Chkhalo // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2006. – Vol. 103. – No. 3. – P. 346-353.
25. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика Том 8. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – Москва: Издательство «Наука», 1982. – 596 С. — ISBN 5-9221-0123-4.
26. Виноградов, А. В. Зеркальная рентгеновская оптика / А. В. Виноградов, И. А. Брытов, А. Я. Грудинский, М. Т. Коган, И. В. Кожевников, В. А. Слемзин – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 87 С. – ISBN 5-217-00598-X.
27. Parratt, L. G. Surface Studies of Solids by Total Reflection of X-Rays / L. G. Parratt // *Phys. Rev.* – Vol. 95. – No. 2. – P. 359–369.
28. Виноградов, А. В. Зеркальная рентгеновская оптика / А. В. Виноградов, И. А. Брытов, А. Я. Грудинский, М. Т. Коган, И. В. Кожевников, В. А. Слемзин – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 106 С. – ISBN 5-217-00598-X.
29. Забродин, И.Г. Установка магнетронного и ионно-пучкового напыления многослойных структур / И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2013. – Вып. 7. – С.37-39.
30. Chkhalo, N. Deposition of Mo/Si multilayers onto MEMS micromirrors and its utilization for extreme ultraviolet maskless lithography / Nikolay Chkhalo, Vladimir Polkovnikov, Nikolay Salashchenko, and Mikhail Toropov // *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena.* – 2017. – Vol. 35. – P. 062002.
31. 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 A.* – 2005. – Vol. 543. – P. 333-339.
32. Garakhin, S. A. High-resolution laboratory reflectometer for the study of x-ray optical elements in the soft and extreme ultraviolet wavelength ranges / S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, I. A. Kas'kov, A. Ya. Lopatin, I. V. Malyshev, A. N. Nechay, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, N. N. Tsybin, I. G. Zabrodin, S. Yu. Zuev // *Rev. Sci. Instrum.* – 2020. – Vol. 91. – P. 063103.

33. Schafers, F. The at-wavelength metrology facility for UV- and XUV-reflection and diffraction optics at BESSY-II / F. Schafers, P. Bischoff, F. Eggenstein, A. Erko, A. Gaupp, S. Kunstner, M. Mast, J.-S. Schmidt, F. Senf, F. Siewert, A. Sokolov, and Th. Zeschke // *J. Synchrotron Radiat.* – 2016. – Vol. 23. – No. 1. – P. 67–77.
34. Sokolov, A. At-wavelength metrology facility for soft X-ray reflection optics / A. Sokolov, P. Bischoff, F. Eggenstein, A. Erko, A. Gaupp, S. Kunstner, M. Mast, J.-S. Schmidt, F. Senf, F. Siewert, Th. Zeschke, and F. Schäfers // *Rev. Sci. Instrum.* – 2016. – Vol. 87. – No. 5. – P. 052005.
35. Senin, Roman. PHASE beamline at Kurchatov synchrotron light source / Roman Senin, Mikhail Borisov, Enver Mukhamedzhanov, Mikhail Kovalchuk // *Acta Cryst.* – 2017. – Vol. A73. – P. 862.
36. Svechnikov, M. Multifitting: software for the reflectometric reconstruction of multilayer nanofilms / Mikhail Svechnikov // *J. Appl. Cryst.* – 2020. – Vol. 53. – No. 1. – P. 244–252.
37. Svechnikov, M. Multifitting 2: software for reflectometric, off-specular and grazing-incidence small-angle scattering analysis of multilayer nanofilms // *J. Appl. Cryst.* – 2024. – Vol. 57. – P. 848–858.
38. Feng, J. Structure, stress and optical properties of Cr/C multilayers for the tender X-ray range / J. Feng, Q. Huang, H. Wang, X. Yang, A. Giglia, C. Xie and Z. Wang // *J. Synchrotron Rad.* – 2019. – Vol. 26. – P. 720–728.
39. Zhu, J. T. Fabrication of Multilayer Reflective Mirrors for Soft X-Ray Laser Working at the Wavelength of 4.48 nm / J. T. Zhu, B. Wang, Z. Zhang, H. C. Wang, Y. Xu, F. L. Wang, Z. S. Wang, L. Y. Chen and M. Q. Cui // *X-Ray Lasers.* – 2006. – P. 547–553.
40. Wen, M. High reflectance Cr/C multilayer at 250 eV for soft X-ray polarimetry / M. Wen, L. Jiang, Z. Zhang, Q. Huang, Z. Wang, R. She, H. Feng, H. Wang // *Thin Solid Films.* – 2015. – Vol. 592. – P. 262 – 265.
41. Deng, S. Effect of defects on the reflectivity of Cr/C multilayer soft X-ray mirror at 4.48 nm / S. Deng, H. Qi, K. Yi, Z. Fan, J. Shao // *Applied Surface Science.* – 2009. – Vol. 255. – P. 7434–7438.
42. Takenaka, H. Multilayer mirrors for m-XPS using a Schwarzschild objective / H. Takenaka, S. Ichimaru, K. Nagai, T. Ohchi, H. Ito and E. M. Gullikson. *Surf. Interface Anal.* – 2005. – Vol. 37. – P. 181–184.
43. Niibe, M. Fabrication and Evaluation of Cr—C Multilayer Mirrors for Soft X-rays / M. Niibe, M. Tsukamoto, T. Iizuka, A. Miyake, Y. Watanabe, and Y. Fukuda // *Intl Symp on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation.* – 1992. – Vol. 1720. – P. 208.
44. Feng, J. Stability of Cr/C multilayer during synchrotron radiation exposure and thermal annealing / J. Feng, Q. Huang, R. Qi, X. Xu, H. Zhou, T. Huo, A. Giglia, X. Yang, H. Wang, Z. Zhang, Z. Wang // *Optics Express.* – 2019. – Vol. 27. – No. 26. – P. 38493–38508.

45. Андреев, С. С. Многослойные рентгеновские зеркала для спектральной области "окна прозрачности углерода" 4.4-5 нм / С. С. Андреев, М. М. Барышева, Ю. А. Вайнер, П. К. Гайкович, Д. Е. Парьев, А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Кристаллография. – 2013. – Т. 58. – Вып. 3. – С. 497.
46. Kuznetsov D. S. Grazing-Incidence La/B-Based Multilayer Mirrors for 6.x nm Wavelength / D. S. Kuznetsov, A. E. Yakshin, J. M. Sturm, and F. Bijkerk // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2019. – Vol. 19. – No. 1. – P. 585.
47. Smertin, R. M. Effects of interface-engineering on the internal structure and reflective characteristics of Cr/Sc multilayer mirrors / R. M. Smertin, M. M. Barysheva, N. I. Chkhalo, S. A. Garakhin, I. V. Malyshev, and V. N. Polkovnikov // Optics Express. – 2024. – Vol. 32. – No. 15. – P. 26583.
48. 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, and F. Bijkerk // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40. – No. 16. – P. 3778-3781.
49. Churilov, S. S. Theoretical investigation of the spectrum and conversion efficiency of short wavelength extreme-ultraviolet light sources based on terbium plasmas / S. S. Churilov, R. R. Kildiyarova, A. N. Ryabtsev, and S. V. Sadovsky // Phys. Scr. – 2009. – Vol. 80. – P. 045303.
50. Otsuka, T. Rare-earth plasma extreme ultraviolet sources at 6.5–6.7 nm / T. Otsuka, D. Kilbane, J. White, T. Higashiguchi, N. Yugami, T. Yatagai, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, and G. O'Sullivan // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 97. – P. 11150.
51. Гарахин, С.А. Возможности многослойных зеркал для измерения концентрации примесей бора в алмазе / С.А. Гарахин, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – Т. 3. – С. 10–13.
52. 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. – Т. 1. – С. 14–20.
53. Lepson, J. K. EUV spectroscopy on NSTX / J. K. Lepson, P. Beiersdorfer, J. Clementson, M. F. Gu, M. Bitter, L. Roquemore, R. Kaita, P. G. Cox and A. S. Safronova // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2010. – Vol. 43. – P. 144018.
54. Chkhalo, N. I. High performance La/B4C multilayer mirrors with barrier layers for the next generation lithography / N. I. Chkhalo, S. Kunstner, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, F. Schafers, and S. D. Starikov // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102. – P. 011602.

55. Naujok, P. Advanced coatings for next generation lithography / P. Naujok, S. Yulin, N. Kaiser, and A. Tünnermann // *Proc. of SPIE.* – 2015. – Vol. 9422. – P. 94221K-1.
56. Makhotkin, I. A. Short period La/B and LaN/B multilayer mirrors for ~6.8 nm wavelength / Igor A Makhotkin, Erwin Zoethout, Robbert van de Kruijs, Sergey N Yakunin, Eric Louis, A M Yakunin, V Banine, S Müllender, Fred Bijkerk // *Opt Express.* – 2013. – Vol 21. – No 24. – P. 29894-904.
57. Naujok, P. Thermal stability of B-based multilayer mirrors for next generation lithography / P. Naujok, K. Murray, S. Yulin, C. Patzig, N. Kaiser, A. Tünnermann // *Thin Solid Films.* – 2017. – Vol. 642. – No. 7.
58. Nguyen, T. D. Microstructure - roughness interrelation in Ru/C and Ru/B4C x-ray multilayers / Tai D. Nguyen, Ronald Gronsky, and Jeffrey B. Kortright // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* – 1993. – Vol. 280. – P. 01993.
59. Borel, C. Reflectivity and stress responses of multilayers upon isothermal treatment / C. Borel, C. Morawe, A. Rommeveaux, C. Huguenot, J-C. Peffen // *Proc. of SPIE.* – 2006. – Vol. 6317. – P. 63170I.
60. Borel, Christine. In situ study of multilayer reflectivity upon heat treatment under synchrotron radiation / Christine Borel, Christian Morawe, Eric Ziegler, Thierry Bigault, Jean-Yves Massonnat, Jean-Christophe Peffen, Emilie Debourg // *Proc. of SPIE.* – 2005. – Vol. 5918. – P. 591801.
61. Huang, Q. Nitridated Ru/B4C multilayer mirrors with improved interface structure, zero stress, and enhanced hard X-ray reflectance / Qiushi Huang, Yang Liu, Yang Yang, Runze Qi, Yufei Feng, Igor V. Kozhevnikov, Wenbin Li, Zhong Zhang, Hui Jiang, Ling Zhang, Aiguo Li, Jie Wang, And Zhanshan Wang // *Optics Express.* – 2018. – Vol. 26. – No. 17. – P. 21803.
62. Asadchikov, V. E. X-ray study of surfaces and interfaces / Asadchikov, V. E., Bukreeva, I. N., Duparré, A., Kozhevnikov, I. V., Krivonosov, Y. S., Morawed, C., Pyatakhin, M. V., Steinert, J., Vinogradov, A. V., Ziegler, E. // *Proceedings Volume 4449, Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II.* – 2001. – Vol. 4449. – P. 253.
63. Bass, M. *Handbook of Optics* / M. Bass. – 1995. – V. 1. – P. 7.1–7.14. - ISBN 0-07-047740-7.
64. 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, and S. Y. Zuev // *Applied Optics.* – 2016. – Vol. 55. – No. 9. – P. 2126-2135.
66. Sae-Lao, B. Molybdenum-strontium multilayer mirrors for the 8-12-nm extreme-ultraviolet wavelength region / B. Sae-Lao and C. Montcalm // *Opt. Lett.* – 2001. – Vol. 26. – No. 7. – P. 468–470.

67. Wang, Z. Extreme ultraviolet broadband multilayer analyzers / Zhanshan Wang, Hongchang Wang, Jingtao Zhu, Yao Xu, Shumin Zhang, Cunxia Li, Fengli Wang, Zhong Zhang, Yongrong Wu, Xinbin Cheng, Lingyan Chen, Alan G. Michette, Slawka J. Pfauntsch, A. Keith Powell, Franz Schäfers, Andreas Gaupp, Mike MacDonald // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 241120.
68. Gupta, P. Interface smoothing of soft x-ray Mo/Y multilayer mirror by thermal treatment / P. Gupta, T.VP. Tenka, S. Rai, M. Nayak and G. S. Lodha // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2007. – Vol. 40. – No. 21. – P. 6684.
69. Kvashennikov, D.S. Internal stresses in Mo/Y multilayer mirrors / Kvashennikov D.S., Vainer Yu. A., Zuev S. Yu., Polkovnikov V.N. // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2019. – Vol. 3. – P. 14–18.
70. Corso, A. J. Extreme ultraviolet multilayer nanostructures and their application to solar plasma observations: A review / Alain J. Corso and Maria G. Pelizzo // *J. Nanosci. Nanotechnol.* – 2019. – Vol. 19. – No. 1. – P. 532–545.
71. Windt, L. Pd/B4C/Y multilayer coatings for extreme ultraviolet applications near 10 nm wavelength / L. Windt and E. M. Gullikson // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54. – No. 18. – P. 5850.
72. Xu, D. Enhancement of soft X-ray reflectivity and interface stability in nitridated Pd/Y multilayer mirrors / Dechao Xu, Qiushi Huang, Yiwen Wang, Pin Li, Mingwu Wen, Philippe Jonnard, Angelo Giglia, Igor V. Kozhevnikov, Kun Wang, Zhong Zhang, and Zhanshan Wang // *Opt. Exp.* – 2015. – Vol. 23. – No. 26. – P. 33018.
73. Wang, Z. Multilayers for EUV, soft x-ray and x-ray optics / Zhanshan Wang, Qiushi Huang, Zhong Zhang // *Proc. SPIE.* – 2018. – Vol. 9747. – P. 97471K-1.
74. Wandg, Y. Nitridated Pd/B4C multilayer mirrors for soft X-ray region: Internal structure and aging effects / Yiwen Wandg, Qiushi Huang, Qiang Yi, Igor V. Kozhevnikov, Runze Qi, Mingwu Wen, Philippe Jonnard, Jinshuai Zhang, Angelo Giglia, Zhong Zhang, and Zhanshan Wang // *Optics Express.* – 2017. – Vol. 25. – No. 7. – P. 7749.
75. Montcalm, C. Survey of Ti-, B-, and Y-based soft X-ray-extreme ultraviolet multilayer mirrors for the 2- to 12-nm wavelength region / C. Montcalm, Patrick A. Kearney, J. M. Slaughter, Brian T. Sullivan, M. Chaker, Henri Pepin, and Charles M. Falco // *Appl. Opt.* – 1996. – Vol. 35. – No. 25. – P. 5134–5147.
76. Kvashennikov, D.S. Multilayer Ag/Y mirrors for the spectral range of 9-11 nm / Kvashennikov D.S., Zuev S.Y., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I., Delmotte F., Meltchakov E. // *Technical Physics.* – 2019. – Vol. 64. – No. 11. – P. 1684-1687.
77. Barysheva, M. M. Precision imaging multilayer optics for soft X-rays and extreme ultraviolet / M. M. Barysheva, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, M. N. Toropov, and N. I. Chkhalo // *Physics-USpekhi.* – 2012. – Vol. 55. – No. 7. – P. 681–699.

78. Bajt, S. Design and performance of capping layers for extreme-ultraviolet multilayer mirrors / Saša Bajt, Henry N. Chapman, Nhan Nguyen, Jennifer Alameda, Jeffrey C. Robinson, Michael Malinowski, Eric Gullikson, Andrew Aquila, Charles Tarrío, and Steven Grantham // *Applied Optics*. – 2003. – Vol. 42. – No. 28. – P. 5750-5758.
79. Windt, D. L. Normal-incidence reflectance of optimized W/B4C x-ray multilayers in the range $1.4 \text{ nm} < \lambda < 2.4 \text{ nm}$ / David L. Windt, Eric M. Gullikson, and Christopher C. Walton // *Optics Letters*. – 2022. – Vol. 27. – No. 24. – P. 2212-2214.
80. Braun, S. Reflectance and Resolution of Multilayer Monochromators for Photon Energies from 400 – 6000 eV / S. Braun, P. Gawlitza, M. Menzel, A. Leson, M. Mertin, and F. Schafers // *Proc. AIP*. – 2007. – Vol. 879. – P. 493.
81. Pradhan, P. C. Optical performance of W/B4C multilayer mirror in the soft x-ray region / P. C. Pradhan, A. Majhi, and M. Nayak // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – Vol. 123. – P. 095302.
82. Kim, C. K. Study and characterization of W/Si and W/B4C multilayer for applications in hard X-rays mirror / Chang Kyu Kim, Young Sei Park, Sei Jin Han, Jang Yool Chae, and Byung-Ki Na // *Korean J. Chem. Eng.* – 2015. – Vol. 32. – No. 10. – P. 2124-2132.
83. Pradhan, P. C. Fabrication and performance of a high resolution ultra-short period W/B4C multilayer structure / P. C. Pradhan, D. Gangir, A. Majhi, M. Nayak, A. Biswas, D. Bhattacharyya and G. S. Lodha // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 49. – P. 135305.
84. Martynov, V. V. High Selective X-ray Multilayers / V.V. Martynov, Yu. Platonov, A. Kazimirov, D.H. Bilderback // *Proceedings of SPIE*. – 2003. – Vol. 5195. – P. 46.
85. Rack, A. Hard X-ray multilayer mirror round-robin on the wavefront preservation capabilities of W/B4C coatings / A. Rack, L. Assoufid, W.-K. Leeb, B. Shi, C. Liu, Ch. Morawe, R. Kluender, R. Conley, N. Bouet // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2012. – Vol. 81. – P. 1696–1702.
86. Barthelmess, M. Thermal and stress studies of normal incidence Mo/B4C multilayers for a 6.7 nm wavelength / M. Barthelmess, S. Bajt // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. – 50. – No. 11. – P. 1610-1619.
87. Zhu, J. Studies on the stress and thermal properties of Mo/B4C and Mo_xC_{1-x}/B4C multilayers / J. Zhu, B. Ji, J. Zhu, H. Jiang, S. Zhu, M. Li and J. Zhang // *Materials Research Express*. – 2020. – Vol. 7. – No. 3. – P. 036403.
88. Choueikani, F. X-ray properties and interface study of B4C/Mo and B4C/Mo₂C periodic multilayers / F. Choueikani, F. Bridou, B. Lagarde, E. Meltchakov, F. Polack, P. Mercere, F. Delmotte // *Applied Physics A*. – 2013. – Vol. 111. – P. 191–198.
89. Niibe, M. Stress Changes and Stability of Sputter-Deposited Mo/B4C Multilayer Films for Extreme Ultraviolet Mirrors / M. Niibe, H. Nii and Y. Sugie // *Jpn. J. Appl. Phys.* – Vol. 41. – P. 3069–3075.

90. Jankowski, A. F. Characterization of Mo/B₄C multilayers / A. F. Jankowski and P. L. Perry // *Thin Solid Films*. – 1991. – Vol. 206. – P. 365-368.
91. Barthelmess, M. Thermal stability of Mo/B₄C multilayers / M. Barthelmess and S. Bajt // *Proc. of SPIE*. – 2011. – Vol. 8077. – P. 807710.
92. Liu, D.-G. A dedicated small-angle X-ray scattering beamline with a superconducting wiggler source at the NSRRC / Liu, D.-G., Chang, C.-H., Liu, C.-Y., Chang, S.-H., Juang, J.-M., Song, Y.-F., Yu, K.-L., Liao, K.-F., Hwang, C.-S., Fung, H.-S., Tseng, P.-C., Huang, C.-Y., Huang, L.-J., Chung, S.-C., Tang, M.-T., Tsang, K.-L., Huang, Y.-S., Kuan, C.-K., Liu, Y.-C., Liang, K. S. & Jeng, U.-S. // *J. Synchrotron Rad.* – 2019. – Vol. 16. – P. 97–104.
93. Andreev, S.S. Short-period multilayer X-ray mirrors / Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Klunokov E.B., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Zorina M.V., Schafers F., Shmaenok L.A. // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2003. – Vol. 10. – No. 5. – P. 358-360.

Список публикаций автора

- A1.** Шапошников Р.А. Исследование структурных и отражательных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/B / Шапошников Р.А., Полковников В.Н., Чхало Н.И., Гарахин С.А. // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – Вып. 1. – С. 57-60.
- A2.** Шапошников Р.А. Многослойные рентгеновские зеркала на основе бора для спектрального диапазона 6.7-9 нм / Шапошников Р.А., Загайнов Н.В., Полковников В.Н., Чхало Н.И., Гарахин С.А., Зуев С.Ю. // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – Вып. 8. – С. 1260-1268.
- A3.** Smertin R.M. Highly reflective Mo/Be/Si multilayer mirrors with zero stress values for 13.5 nm wavelength / Smertin R.M., Chkhalo N.I., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Shaposhnikov R.A., Zuev S.Yu. // Thin Solid Films. – 2023. – Vol. 782. – P. 140044.
- A4.** Шапошников Р.А. Структурные и отражательные характеристики Cr/C многослойных зеркал, полученных методом реактивного распыления / Р.А. Шапошников, С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95, вып. 9. – С. 1817–1824.
- A5.** Shaposhnikov R.A. Highly reflective Cr/C-based multilayer X-ray mirrors for the wavelength $\lambda = 4.47$ nm / R.A. Shaposhnikov, V.N. Polkovnikov, S.A. Garaknin, N.I. Chkhalo, and M.M. Barysheva // Optics Letters. – 2026. - Vol. 51, No. 4. – P. 1049.
- A6.** Shaposhnikov R.A. Ru/Sr multilayer mirrors for the spectral range 9–12 nm / Shaposhnikov R.A., Zuev S.Yu., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I. // Technical Physics. – 2024. – Vol. 69. – No 3. – P. 713-718.
- A7.** Polkovnikov V.N. Highly reflective Ru/Y multilayer mirrors for the spectral range of 9-11 nm / Polkovnikov V.N., Shaposhnikov R.A., Zuev S.Y., Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Sertsu M.G., Sokolov A., Schafers F. // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – No 11. – P. 19332-19342.
- A8.** Shaposhnikov R.A. Highly reflective Ru/Sr multilayer mirrors for wavelengths 9–12 nm / Shaposhnikov R.A., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Chkhalo N.I., Zuev S.Yu. // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – No 17. – P. 4351.

A9. Полковников, В.Н. Многослойные зеркала на основе Y для спектрального диапазона 8-12 нм / В.Н. Полковников, Р.А. Шапошников, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашченко, Н.А. Дюжев, Ф.А. Пудонин, Г.Д. Демин // Краткие сообщения по физике ФИАН. - 2021. - №.12. - С.58-60.

A10. Chkhalo N.I. Prospective wavelengths for projection lithography using synchrotron radiation / Chkhalo N.I., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Shaposhnikov R.A. // Technical Physics. – 2024. – Vol. 69. – No 4. – P. 818-823.

A11. Shaposhnikov R.A. Investigation of the properties of multilayer mirrors based on a pair of materials Mo/B4C / Shaposhnikov R.A., Garakhin S.A., Durov K.V., Polkovnikov V.N., Chkhalo N.I. // Technical Physics. – 2024. – Vol. 69. – No 6. – P. 1803-1807.

A12. Shaposhnikov R. Investigation of structural and reflective characteristics of short-period Mo/B4C multilayer x-ray mirrors / Shaposhnikov R., Polkovnikov V., Garakhin S., Vainer Yu., Chkhalo N., Smertin R., Durov K., Glushkov E., Yakunin S., Borisov M. // Journal of Synchrotron Radiation. – 2024. – Vol. 31. – No 2. – P. 268-275.

A13. Артюхов А.И. Безмасочный литограф прямого рисования. конструкция, устройство и применение / Артюхов А.И., Морозов С.С., Петрова Д.В., Чхало Н.И., Шапошников Р.А. // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – Вып 8. – С. 1295-1301.

A14. Полковников В.Н. Короткопериодные многослойные зеркала для высокоразрешающего монохроматора многослойное зеркало/кристалл / Полковников В.Н., Чхало Н.И., Шапошников Р.А., Николенко А.Д. // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – Вып 7. – С. 943-947.

A15. Глушков Е. И. Двухзеркальный монохроматор для синхротронов поколения 4+ / Глушков Е.И., Ахсахалян А.А., Вепрев П.А., Забродин И.Г., Зорина М.В., Малышев И.В., Михайленко М.С., Пестов А.Е., Петраков Е.В., Плешков Р.С., Антюшин Е.С., Полковников В.Н., Реунов Д.Г., Уласевич А.Б., Чернышев А.К., Чхало Н.И., Шапошников Р.А., Ракшун Я.В., Хомяков Ю.В., Чернов В.А., Долбня И.П. // Журнал технической физики. – 2025. – Т. 95. – Вып 10. – С. 1963-1972.

A16. Reunov D.G. Observation of quasi-bragg scattering by goebel mirrors / Reunov D.G., Akhsakhalyan A.A., Akhsakhalyan A.D., Chkhalo N.I., Shaposhnikov R.A., Drozdov Yu.N. // *Journal of Applied Crystallography*. – 2024. – Vol. 57. – No 4. – PA. 925-930.

A17. Bugaev A.V. Structural and thermal stability of B4C/Ru multilayers with carbon barrier layers / Bugaev A.V., Sakhonenkov S.S., Gaisin A.U., Shaposhnikov R.A., Polkovnikov V.N., Filatova E.O. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2026. – Vol. 28. – P. 2152.

A18. Sakhonenkov S.S. Chemical interactions at interfaces in nanoscale Mo/B4C multilayered structures / Sakhonenkov S.S., Bugaev A.V., Shaposhnikov R.A., Polkovnikov V.N., Filatova E.O. // *Surfaces and Interfaces*. – 2024. – Vol. 55. – P. 105467.

Тезисы и материалы конференций

Т1. С. А. Гарахин. Многослойные рентгеновские зеркала типа Фабри-Перо на основе стековых структур / С. А. Гарахин, Р. А. Шапошников, М. М. Барышева, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало // Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». – 2022. – С. 19.

Т2. Полковников В. Н. Определение внутренних напряжений многослойных структур Mo/Si интерферометрическим методом / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022» // Полковников В. Н., Чхало Н. И., Торопов М. Н., Смертин Р. М., Шапошников Р. А. – 2022. – С. 73.

Т3. Е.И. Глушков. Методика изготовления и тестирования высокоточных цилиндрических зеркал для рентгеновского диапазона / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023» // Е.И. Глушков, А.И. Артюхов, А.А. Ахсахалян, М.В. Зорина, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, Е.В. Петраков, В.Н. Пестов, В.Н. Полковников, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. – 2023. – С. 63.

Т4. К.В. Дуров. Многослойные рентгеновские зеркала W/V4C для рентгенофлуоресцентной спектроскопии / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023» // К.В. Дуров, А.А. Ахсахалян, С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. – 2023. – С. 66.

Т5. А.И. Артюхов. Методика изготовления стриповых зеркал с помощью УФ-литографа / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023» // А.И. Артюхов, Е.И. Глушков, И.В. Малышев, А.И. Николаев, А.Е. Пестов, Д.В. Петрова, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. – 2023. – С. 73.

Т6. Р. А. Шапошников. Исследование структурных и отражательных характеристик короткопериодных Mo/V4C многослойных рентгеновских зеркал / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023» // Р. А. Шапошников, В. Н. Полковников, С. А. Гарахин, Ю. А. Вайнер, Н. И. Чхало, Р. М. Смертин, К. В. Дуров, Е. И. Глушков, С. Н. Якунин, М. М. Борисов. – 2023. – С. 87.

Т7. Д.Г. Реунов. Квазибрегговское рассеяния в зеркалах Гебеля / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023» // Д.Г. Реунов, А.А. Ахсахалян, А.Д. Ахсахалян, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. – 2023. – С. 97.

Т8. А.К. Чернышев. Оценка влияния систематических ошибок позиционирования при ионно-пучковой коррекции формы / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024» // А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Р.А. Шапошников. – 2024. – С. 37.

Т9. Шапошников Р.А. Исследование отражательных свойств и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/V / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024» // Шапошников Р.А., Полковников В.Н., Чхало Н.И., Гарахин С.А. – 2024. – С. 63.

T10. Шапошников Р.А. Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов В/С для спектрального диапазона 67 – 90 А / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024» // Шапошников Р.А., Полковников В.Н., Чхало Н.И., Гарахин С.А. – 2024. – С. 71.

T11. Шапошников Р.А. Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Ст/V для спектрального диапазона 24.2 – 27.3 А / Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024» // Шапошников Р.А., Полковников В.Н., Чхало Н.И., Гарахин С.А. – 2024. – С. 72.

T12. В.Н. Полковников. Многослойные короткопериодные структуры на основе W/V4C / Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // В.Н. Полковников, Р.А. Шапошников, Н.И. Чхало, А.Д. Николенко. – 2022. – Т. 1. – С. 588.

T13. В.Н. Полковников. Многослойные зеркала для спектрального диапазона 8–12 нм / Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // В.Н. Полковников, Р.А. Шапошников, С.Ю. Зуев, М.В. Свечников, М.Г. Сертсу, А. Соколов, Ф. Шаферс, Н.И. Чхало. – 2022. – Т. 1. – С. 586.

T14. С. А. Гарахин. Многослойные рентгеновские зеркала типа Фабри — Перо на основе стековых структур / Труды XXVII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // С. А. Гарахин, Р. А. Шапошников, М. М. Барышева, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало. – 2023. – Т. 2. – С. 841.

T15. В. Н. Полковников. Свойства короткопериодных многослойных рентгеновских зеркал Мо/V4C / Труды XXVII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, Р. А. Шапошников, К. В. Дуров, С. А. Гарахин. – 2023. – Т. 2. – С. 928.

T16. А. И. Артлюхов. Литограф прямого изображения для структурирования поверхности / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // А. И. Артлюхов, С. С. Морозов, Н. И. Чхало, Р. А. Шапошников, Е. С. Антюшин, Д. В. Петрова, А. И. Николаев, В. Н. Полковников, М. Н. Торопов, А. Е. Пестов. – 2024. – Т. 1. – С. 439.

T17. Е. И. Глушков. Двухзеркальный многослойный монохроматор для синхротронов поколения 4+ / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // Е. И. Глушков, И. В. Малышев, Е. В. Петраков, А. К. Чернышев, М. С. Михайленко, Р. С. Плешков, Р. А. Шапошников, А. И. Артлюхов, Н. И. Чхало, Ю. В. Хомяков, Я. В. Ракшун, В. А. Чернов, И. П. Долбня. – 2024. – Т. 1. – С. 458.

T18. К. В. Дуров. Многослойные рентгеновские зеркала W/V4C для рентгенофлуоресцентной спектроскопии / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника» // К. В. Дуров, А. А. Ахсахалян, С. А. Гарахин, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, Р. А. Шапошников. – 2024. – Т. 1. – С. 467.

- T19.** Н. В. Загайнов. Связь энергии активации диффузии и энтальпии образования соединений с величиной межслоевой шероховатости многослойных структур / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Н. В. Загайнов, Р. А. Шапошников, К. В. Дуров, В. Н. Полковников. – 2024. – Т. 1. – С. 475.
- T20.** Д. Г. Реунов. Наблюдение квазибрэгговского рассеяния в зеркалах Гёбеля / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Д. Г. Реунов, А. А. Ахсахалян, А. Д. Ахсахалян, Н. И. Чхало, Р. А. Шапошников. – 2024. – Т. 1. – С. 519.
- T21.** Р. А. Шапошников. Многослойные рентгеновские зеркала на основе бора для спектрального диапазона 6,7–9 нм / Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Р. А. Шапошников, Н. В. Загайнов, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев. – 2024. – Т. 1. – С. 545.
- T22.** А. И. Артлюхов. Разработка метода позиционирования и анализа плоскостно-геометрических габаритов оптических элементов / Тезисы докладов XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // А. И. Артлюхов, А. К. Чернышев, Р. А. Шапошников, А. Е. Пестов, Н. И. Чхало. – 2025. – С. 495.
- T23.** Е. И. Глушков. Двухзеркальный многослойный монохроматор для синхротронов поколения 4+ / Тезисы докладов XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Е. И. Глушков, И. В. Малышев, Д. Г. Реунов, Е. В. Петраков, Н. И. Чхало, А. К. Чернышев, А. Е. Пестов, Р. А. Шапошников, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, А. А. Ахсахалян, М. В. Зорина, Ю. В. Хомяков, Я. В. Ракшун, В. А. Чернов. – 2025. – С. 504.
- T24.** Р. А. Шапошников. Многослойные рентгеновские зеркала для «окна прозрачности углерода» / Тезисы докладов XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Р. А. Шапошников, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, С. А. Гарахин, М. М. Барышева. – 2025. – С. 552.
- T25.** Р. А. Шапошников. Многослойные рентгеновские зеркала для «окна прозрачности воды» на основе пары материалов Cr/V / Тезисы докладов XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Р. А. Шапошников, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало. – 2025. – С. 553.
- T26.** Р. А. Шапошников. Многослойные рентгеновские зеркала на основе бора для спектрального диапазона 6,65–9 нм / Тезисы докладов XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника» // Р. А. Шапошников, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, С. А. Гарахин, М. А. Барышева. – 2025. – С. 554.

Патенты

П1. Абрамов И.С., Голубев С.В., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Полковников В.Н., Салашенко Н.Н., Смертин Р.М., Чхало Н.И., Шапошников Р.А.; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"; Мощный источник направленного экстремального ультрафиолетового излучения с длиной волны 9 - 12 нм для проекционной литографии высокого разрешения; Патент № 2808771; Заявка № 2023116539;

Выступления на конференциях

- 1) XXVI симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2022 год. Устный доклад «Многослойные зеркала для спектрального диапазона 8 - 12 нм».
- 2) XXVI симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2022 год. Стендовый доклад «Короткопериодные многослойные зеркала для высокоразрешающего монохроматора МРЗ/кристалл».
- 3) Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022», г. Нижний Новгород, 2022 год. Устный доклад «Определение внутренних напряжений многослойных структур Mo/Si интерферометрическим методом».
- 4) XXVII симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2023 год. Устный доклад «Свойства короткопериодных многослойных рентгеновских зеркал Mo/B4C».
- 5) Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2023», г. Нижний Новгород, 2023 год. Стендовый доклад «Исследование структурных и отражательных характеристик короткопериодных Mo/B4C многослойных рентгеновских зеркал».
- 6) XXVIII симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2024 год. Стендовый доклад «Многослойные рентгеновские зеркала на основе бора для спектрального диапазона 6.7 – 9 нм».
- 7) Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024», г. Нижний Новгород, 2024 год. Стендовый доклад «Многослойные рентгеновские зеркала на основе пары материалов Cr/V для спектрального диапазона 24.2 – 27.3 А».
- 8) Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2024», г. Нижний Новгород, 2024 год. Устный доклад «Исследование отражательных свойств и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал на основе бора».
- 9) XXIX симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2025 год. Устный доклад «Многослойные рентгеновские зеркала для «окна прозрачности углерода».

10) XXIX симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2025 год. Стендовый доклад «Многослойные рентгеновские зеркала для «окна прозрачности воды» на основе пары материалов Cr/V».