

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

Смертин Руслан Маратович

**«МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ БЕЗМАСОЧНОЙ И
ПРОЕКЦИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ»**

Научная специальность: 1.3.2– приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
член-корр. РАН,
Чхало Николай Иванович

Нижний Новгород - 2025

Оглавление

Список сокращений.....	5
Введение.....	6
Глава 1. Методы изготовления и исследования многослойных зеркал.....	19
1.1 Проблемы проекционной литографии.....	19
1.2 Многослойные рентгеновские зеркала для спектральной области 11.2 - 13.5 нм.....	22
1.2.1 МРЗ для 11.2 нм.....	22
1.2.2 МРЗ для 13.5 нм.....	24
1.2.3 Внутренние напряжения в МРЗ.....	26
1.3 Оборудование и методы синтеза и изучения свойств исследуемых покрытий.....	29
1.3.1 Установка для синтеза многослойных зеркал и пленок..	29
1.3.2 Методика исследований МРЗ с помощью рентгеновской дифракции и рефлектометрии.....	34
1.3.3 Методика исследований МРЗ с помощью РФЭС комбинационного рассеяния, ВИМС, РФА и АСМ.....	36
1.3.4 Методика исследований МРЗ с помощью EXAFS спектроскопии.....	36
1.3.5 Методы определения внутренних напряжений.....	38
Глава 2. Исследование Mo/Be и Ru/Be многослойных зеркал для области длин волн 11 нм.....	43
2.1 Изучение рентгенооптических и физических характеристик МРЗ Mo/Be.....	43
2.1.1 Исследование термической стабильности.....	44
2.1.2 Исследование микроструктуры слоев и интерфейсов....	48
2.2 Изучение свойств МРЗ Ru/Be.....	60
2.2.1 Изучение МРЗ Ru/Be.....	61
2.2.2 Изучение МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на границах раздела.....	62

2.2.3 Изучение временной стабильности отражательных характеристик.....	71
2.2.4 Изучение внутренних напряжений.....	73
2.3 Сравнение эффективности 12-ти зеркальной оптической системы литографа на длинах волн 13.5 и 11.2 нм.....	76
2.4 Основные результаты по главе 2.....	78
Глава 3. Поиск и изучение отражающих покрытий для динамической маски для безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм.....	80
3.1 МРЗ Mo/Be/Si.....	81
3.1.1 Внутренние напряжения и отражательная характеристика МРЗ Mo/Be/Si.....	81
3.1.2 Осаждение МРЗ Mo/Be/Si на поверхность динамической маски.....	83
3.2 Поиск и исследование диэлектрических и бесстрессовых отражающих покрытий на длину волны 13.5 нм.....	87
3.2.1 Изучение систем на основе пары Mo/Si.....	87
3.2.1.1 МРЗ Mo/Si с N ₂	87
3.2.1.2 МРЗ Mo/Si с O ₂	91
3.2.2 Изучение МРЗ Si/C и Si/B ₄ C.....	96
3.2.2.1 Рост Si/C и Si/B ₄ C при повышенном значении давления рабочего газа аргона.....	97
3.2.2.2 Осаждение МРЗ C/Si на поверхность динамической маски.....	100
3.2.2.3 Исследование МРЗ Si/C и Si/B ₄ C, осажденных в среде рабочего газа Ar + H ₂	100
3.3 Основные результаты по главе 3.....	104
Глава 4. Нанесение и исследование МРЗ C/Si на МЭМС.....	107
4.1 Характеристики коммерчески доступной матрицы микрзеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600.....	107
4.2 Исследование работоспособности и коэффициента отражения МЭМС микрзеркал после съема защитного стекла и нанесения отражающего покрытия.....	112

4.3 Испытание МЭМС микрозеркал интенсивным пучком излучения с длиной волны 13.5 нм.....	116
4.3 Основные результаты по главе 4.....	119
Заключение.....	121
Список литературы.....	124
Список работ автора по теме диссертации.....	133

Список сокращений

СБИС	–	Сверхбольшие интегральные схемы
ЭУФ (EUV)	–	Экстремальное ультрафиолетовое излучение
NA	–	Числовая апертура
МРЗ	–	Многослойное рентгеновское зеркало
БМРЛ	–	Безмасочная рентгеновская литография
МЭМС	–	Микроэлектромеханическая система
АСМ	–	Атомно–силовая микроскопия
XAFS	–	X-ray absorption fine structure (Тонкая структура спектров поглощения рентгеновских лучей)
РФЭС	–	Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия
ВИМС	–	Вторичная ионная масс-спектрометрия
РФА	–	Рентгенофлуоресцентный анализ
s	–	Внутренние механические напряжения
R	–	Коэффициент отражения / отражательная способность
$\Delta\lambda$	–	Спектральная полоса (ширина) отражения
DMD	–	Digital micromirror device (цифровое микрозеркальное устройство)
ALD	–	Atomic Layer Deposition (Атомно-слоевое осаждение)

Введение

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Литография является ключевой технологией производства элементов микро- и нано-электроники, определяющей топологические нормы и степень интеграции сверхбольших интегральных схем (СБИС). С 2018 г. при производстве слоев чипов с минимальными топологическими размерами стала использоваться проекционная ЭУФ (экстремальное ультрафиолетовое излучение) литография на рабочей длине волны 13.5 нм. Для этих целей, к примеру, используются установки серии NXE:3400 от компании ASML, Нидерланды [1]. Латеральное разрешение этих установок ограничено числовой апертурой проекционного объектива $NA = 0.33$ и составляет 13 нм. Для увеличения разрешающей способности до суб-10 нм разрабатывается проекционный объектив с $NA = 0.55$. Однако, как показано в [2], разработчики сталкиваются с серьезными проблемами, в том числе связанными с экранированием стенками маски проецируемых наноструктур.

Альтернативой увеличению числовой апертуры для повышения разрешающей способности литографа является снижение длины волны. В работе [3] впервые было предложено использовать для литографии следующего поколения длину волны в районе 6.7 нм. Эта длина волны была выбрана из соображений, что она, во-первых, сразу вдвое повышает разрешение. Во-вторых, в этом диапазоне многослойные рентгеновские зеркала (MPЗ) La/B теоретически имеют коэффициент отражения более 80%. Однако, в следствие, в силу недостаточно высоких экспериментальных коэффициентов отражения MPЗ La/B, около 60% [4,5] и узкой, по сравнению с эмиссионной полосой источника, полосой пропускания многозеркальной системы, низкой конверсионной эффективностью лазерно-плазменных источников на основе ионов Tb и Gd [6], а также несовпадения максимумов отражения MPЗ и эмиссионной полосы лазерно-плазменного источника, в [7] был сделан вывод о

бесперспективности этой длины волны для высокопроизводительной литографии. Поэтому поиск высокоотражающих МРЗ с коэффициентами отражения не ниже, чем обеспечивают МРЗ Mo/Si на длине волны 13.5 нм, является крайне актуальным. Одной из перспективных длин волн является 11.2 нм. Во-первых, укорочение длины волны автоматически повысит разрешающую способность на ~20%. Во-вторых, в этой спектральной области МРЗ Ru/Be по расчету имеют более высокие коэффициенты отражения, чем МРЗ Mo/Si в области 13.5 нм. В-третьих, на эту область приходится максимум эмиссионной способности высокозарядных ионов ксенона, а из практики известно, что источник такого типа производит существенно меньше загрязнений, чем оловянный, используемый на длине волны 13.5 нм.

Одна из проблем традиционной литографии, основанной на проекции изображения маски (шаблона) на пластину с резистом, является сильная зависимость стоимости литографического процесса от объемов производства. Это обусловлено большим числом и дороговизной масок. Технология становится конкурентоспособной только при массовом производстве, от миллиона чипов в год [8]. Поэтому поиск альтернативных методов литографии, которые обеспечат нанометровые топологии литографического процесса и слабую зависимость стоимости процесса литографии от масштабов производства, является крайне актуальной задачей. Большие надежды возлагались на многопучковую электронную литографию. В частности, компании Mapper Lithography удалось достичь производительности более 1 пластины диаметром 300 мм в час [9]. Однако основную проблему многопучковой электронной литографии – электромагнитное взаимодействие между пучками, так решить и не удалось.

Одним из способов решения этой проблемы является развитие безмасочных методов литографии. Одним из перспективных кандидатов на эту роль является безмасочная рентгеновская литография (БМРЛ), предложенная в [10]. Пространственное разрешение определяется короткой длиной волны, а функцию маски выполняет микро-электро-механическая система (МЭМС)

микрозеркал. В работах [11-13] показано, что: во-первых, на экспериментальную МЭМС удалось нанести отражающее Mo/Si покрытие с коэффициентом отражения 40% на длине волны 13.5 нм; во-вторых, производительность таких литографов при реалистичных параметрах оптики и лабораторных источников рентгеновского излучения может достигать единиц пластин, диаметром 300 мм в час, что представляет интерес не только для мелкосерийного, но даже для массового производства. Ключевой проблемой, препятствующей развитию этой прорывной технологии, является отсутствие работоспособных МЭМС, отражающих рентгеновское излучение. Это, в частности, связано с наличием механических напряжений в пленках, приводящие к катастрофическому искажению формы поверхности микрозеркал в силу их малой, на уровне долей микрометров, толщине.

Поэтому поиск новых композиций МРЗ, обеспечивающих околонулевые внутренние механические напряжения и высокие коэффициенты отражения является крайне актуальной задачей для развития безмасочной рентгеновской литографии.

Цель и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются поиск новых композиций МРЗ на основе бериллия, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения в окрестности длины волны 11 нм, а электрически-непроводящих, без внутренних механических напряжений отражающих покрытий для безмасочной рентгеновской литографии на длине волны 13.5 нм.

Для достижения целей диссертационной работы решались следующие задачи.

1) Синтез и изучение физических и рентгенооптических свойств МРЗ Mo/Be, оптимизированных для работы на длине волны 11.2 нм.

2) Синтез и изучение физических и рентгенооптических свойств МРЗ Be/Ru и МРЗ Be/Ru с буферными слоями Mo на межслойных границах, оптимизированных для работы на длине волны 11.2 нм.

3) Поиск, синтез и изучение бесстрессовых, электрически не проводящих отражающих покрытий для безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм.

4) Изучение свойств поверхности, коэффициентов отражения, долговременной стабильности, работоспособности и радиационной стойкости экспериментального образца динамической маски с покрытием, отражающим излучение на длине волны 13.5 нм, на базе МЭМС микрозеркал.

Научная новизна

Все основные результаты, полученные в рамках диссертации, обладают научной новизной.

1) Впервые исследована микроструктура слоев и интерфейсов МРЗ Mo/Be и продемонстрирована возможность повышения коэффициента отражения на длине волны, в окрестности 11 нм, за счет изотермического вакуумного отжига.

2) Впервые исследована внутренняя микроструктура и рентгенооптические свойства МРЗ Be/Ru и МРЗ Be/Ru с буферными слоями Mo на границах раздела. Получен рекордный коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм, который составил $R=72.2\%$ при $\Delta\lambda=0.38$ нм. Установлено, что коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм у МРЗ Mo/Ru/Mo/Be не изменяется в течении минимум двух лет. Получены околонулевые значения внутренних напряжений и доказано существование бесстрессового состояния при значении отражательной способности выше 71%.

3) Впервые предложен новый дизайн МРЗ Mo/Si с «нулевыми» внутренними напряжениями и с коэффициентом отражения на уровне 67% на длине волны 13.5 нм.

4) Впервые получено бесстрессовое, диэлектрическое МРЗ, оптимизированное для работы на длине волны 13.5 нм, и обладающая коэффициентом отражения на уровне $R \sim 11\%$.

5) Впервые на базе коммерчески доступной МЭМС микрозеркал изготовлен экспериментальный образец динамической маски, отражающей

рентгеновское излучение с длиной волны в окрестности 13.5 нм и изучены его характеристики – коэффициент отражения, долговременная стабильность и радиационная стойкость к облучению излучением с длинами волн в окрестности 13.5 нм.

Научная и практическая значимость

Результаты диссертационной работы имеют научную и практическую ценность.

Экспериментально показана возможность создания высокоэффективных МРЗ для литографических установок на длине волны в окрестности 11 нм. Расчетное значение оптической эффективности литографической установки на длине волны 11.2 нм на 36% выше, чем у литографических установок на длине волны 13.5 нм. Также, переход на более короткую рабочую длину волны позволит увеличить разрешающую способность литографического процесса. Экспериментально доказано существование бесстрессового высокоотражающего МРЗ Ru/Be для работы на длине волны в окрестности 11 нм с высоким, на уровне 71%, коэффициентом отражения, которая представляет интерес для оптики дифракционного качества.

Экспериментально получено бесстрессовое высокоотражающие МРЗ Mo/Be/Si, оптимизированное для работы на длине волны 13.5 нм с высоким, на уровне 67%, коэффициентом отражения, которая представляет интерес для оптики дифракционного качества в окрестности длины волны 13.5 нм.

Экспериментально получено бесстрессовое и диэлектрическое МРЗ C/Si, обладающее коэффициентом отражения на уровне $R \sim 11\%$ на длине волны 13.5 нм

Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность создания динамической маски на основе МЭМС микрозеркал, отражающей излучение с длиной волны 13.5 нм, а также сохранение ее работоспособности при облучении излучением в окрестности длины волны 13.5 нм с

интенсивностью, моделирующей работу в условиях близких к реальному литографу.

Методология и методы исследований

Объектами для исследования стали многослойные периодические системы Mo/Be, Ru/Be, Ru/Be с прослойками Mo на различных границах, Mo/Si, Mo/Be/Si, C/Si, B₄C/Si и тонкие пленки данных материалов.

Тонкие пленки и МРЗ наносились методом магнетронного осаждения в среде аргона, а также смеси двух газов. В качестве второго газа выступали азот, кислород и водород. Рабочее давление газа при технологическом процессе в разных экспериментах менялось от $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Торр до $\sim 1.2 \cdot 10^{-2}$ Торр.

Исследование толщин пленок и рентгенооптических параметров МРЗ производились методами рентгеновской рефлектометрии. Характеристики структур определялись в результате обработки данных коэффициентов отражения, измеренных в мягкой и жёсткой рентгеновских областях с помощью лабораторных и синхротронных рефлектометров. Обработка измерений проводилась с помощью программных пакетов IMD и Multifitting.

Микроструктура пленочных материалов, а также возможное образование кристаллических фаз на границах раздела исследовалась методом широкоугольной дифракции на дифрактометре Bruker D8 Discover (Bruker AXS, Германия). Обработка результатов измерений проводилась с использованием программных пакетов DIFFRAC.EVA и DIFFRAC.Leptos компании Bruker AXS.

Исследования шероховатости, формы поверхности и размерных параметров микрозеркал производились с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), интерферометрии белого света и цифровой сканирующей электронной, и оптической микроскопии.

Изотермический отжиг проводился в вакуумной печи, при давлении $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Торр в течении разного количества времени. Контроль температуры проводился с использованием термопары хромель-алюмель.

Определение внутренней микроструктуры образцов проводилась также с использованием EXAFS и РФЭС на оборудовании Курчатовского НИЦ, ВИМС методом на масс-спектрометре вторичных ионов TOF.SIMS 5 (ION-TOF, Германия), и Рамановской спектроскопии на спектрометре T64000 Horiba Jobin Yvon.

Определение внутренних напряжений проводилось по формуле Стоуни в результате изменения радиусов кривизны подложки до и после осаждения покрытия на нее. Определение радиусов кривизны проводилось оптическим и интерферометрическим методами. Оптическим – по изменению расстояния между двумя, исходно параллельными, лазерными лучами, падающих на исследуемый образец. Интерферометрическим – по изменению профиля поверхности исследуемого образца. Интерферометрический метод использовался для определения напряжений только в МРЗ Ru/Be.

Определение электросопротивления многослойных систем проводилось 4-х контактным методом.

Элементный анализ МЭМС в разных координатах матрицы микрозеркал определялся на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss SUPRA 50 VP.

Облучение МЭМС микрозеркал излучениями с длинами волн в окрестности 13.5 нм, а также измерения коэффициентов отражения производились на лабораторных рефлектометрах с лазерно-плазменным источником рентгеновского излучения и с помощью разборной рентгеновской трубки.

Положения, выносимые на защиту

1) Переходные области в МРЗ Mo/Be состоят из двух соединений. На границе Mo-на-Be образуется соединение с малым содержанием бериллия – MoBe_2 . На границе Be-на-Mo образуется соединение с большим содержанием бериллия – MoBe_{12} или MoBe_{22} . Вакуумный отжиг при 1 часе до температуры 300°C не приводит к изменению внутренней микроструктуры и происходит

рост коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм из-за перераспределения кислорода внутри МРЗ. Вакуумный отжиг в течении 4 часов приводит к изменению внутренней микроструктуры и происходит падение коэффициента отражения.

2) Отражательные характеристики МРЗ Ru/Be ограничены широкими переходными границами раздела (Ru-на-Be~1 нм, Be-на-Ru~0.4 нм) и перемешиванием материалов слоев между собой. Внедрение буферных слоев Mo на границы раздела приводит к меньшему перемешиванию слоев системы между собой и уменьшению ширины переходной границы Ru-на-Be до 0.8 нм, что позволило получить рекордный коэффициент отражения ($R=72.2\%$). МРЗ Mo/Ru/Mo/Be обладает временной стабильностью коэффициента отражения и околонулевыми механическими внутренними напряжениями.

3) МРЗ Mo/Be/Si с толщинами слоев Si~1 нм, Mo~2.8 нм, Be~3.2 нм, обладает нулевыми внутренними напряжениями, при этом обеспечивает высокие, на уровне $R\sim 66-67\%$, коэффициенты отражения при нормальном падении в окрестности длины волны 13.5 нм.

4) МРЗ C/Si, изготовленное в среде аргон+водород при соотношении парциального давления аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2, обеспечивает околонулевую электропроводность и внутренние механические напряжения и максимальный коэффициент отражения $R=11\%$ на $\lambda=13.5$ нм. Нанесение МРЗ C/Si на коммерчески доступную МЭМС микрозеркал не нарушает работоспособности МЭМС и позволяет получить пиковый коэффициент отражения $R=2.8\%$ и интегральный $R=7.1\%$. Причинами низкого пикового коэффициента отражения многослойных зеркал являются большие ~2 нм микрошероховатость поверхности МЭМС микрозеркал и угловой разброс положения микрозеркал относительно среднего положения. Облучение МЭМС с МРЗ C/Si излучением с длиной волны 13.5 нм и с плотностью рентгеновской мощности 0.21 мВт/см² не влияет на работоспособность МЭМС.

Публикации по теме

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 39 работ. Опубликовано 19 статей в научных журналах [A1-A19], 19 статей в сборниках конференций и тезисов докладов [T1-T19] и один патент [П1].

Личный вклад автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, подготовка и исследование образцов, анализ и обобщение полученных результатов, написание и публикация статей.

Работы, связанные с синтезом многослойных рентгеновских зеркал и пленок материалов методом магнетронного осаждения были выполнены автором самостоятельно. Работы, связанные с измерением и исследованием отражательных характеристик многослойных зеркал и пленок материалов с помощью четырехкристального дифрактометра с рабочей длиной волны 0.154 нм выполнены автором самостоятельно. Работы, связанные с изучением и восстановлением структурных параметров многослойных зеркал и пленок материалов по данным рентгеновской рефлектометрии были выполнены автором самостоятельно. Работы по определению значений внутренних напряжений и оптическим и интерферометрическим методами выполнены автором самостоятельно.

Работы по измерению отражательных характеристик многослойных зеркал и облучению МЭМС микрозеркал на лабораторных рефлектометрах проводились при участии С.А. Гарахина и С.Ю. Зуева. Измерения на синхротроне BESSY-II проводились при участии А. Соколова и М.В. Свечникова. Измерение и анализ структур методом рентгеновского фазового анализа проводился при участии П.А. Юнина. Измерение и анализ структур методом ВИМС проводился при участии М.Н. Дроздова. Измерение и анализ структур методом РФЭС проводился при участии группы из СПбГУ под

руководством профессора Е.О. Филатовой. Измерение и анализ структур методом Рамановской спектроскопии проводился при участии Н. Кумара. Измерение шероховатости поверхности методом АСМ проводился при участии М. В. Зориной. Измерение и анализ структур методом EXAFS спектроскопии проводились в НИЦ Курчатовский институт при участии А.Л. Тригуба. Вакуумный отжиг образцов проводился при участии Е.Д. Чхало. Измерение удельных электросопротивлений отражающих покрытий и пленок 4-х контактным методом проводился при участии А.Я. Лопатина. Элементный анализ МЭМС микрозеркал проводился при участии С.А. Гусева.

Степень достоверности и апробация результатов

Работа выполнена на современном оборудовании. Научные положения и результаты диссертации не противоречат результатам других научных групп. Все результаты были представлены в реферируемых научных и специализированных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в данной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях:

XXIII международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11 – 14 марта 2019 г. – 1 стендовый доклад

313. PTB Seminar VUV and EUV Metrology, Berlin, Germany, October 22-23, 2019, – 1 устный доклад

XXIV международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 10 – 13 марта 2020 г. – 2 стендовый и 4 устный доклада

XXV международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 9 – 12 марта 2021 г. – 3 стендовый и 1 устный доклада

Конференция "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике", 2021 год, - 1 устный доклад

XXVI международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 14 – 17 марта 2022 г. – 1 стендовый и 1 устный доклад

Научная школа «Современная рентгеновская оптика», г. Нижний Новгород, 14 – 17 сентября 2022 г. – 2 устных доклада

XXVII международный симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 14 – 17 марта 2023 г. – 1 устный доклад

XXVIII международный симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11 – 15 марта 2024 г. – 1 устный доклад

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 139 страницах, содержит 86 наименования библиографии, 53 рисунка и 18 таблиц.

Содержание работы по главам

Во введении обосновывается актуальность темы и формулируются цели и задачи диссертационной работы. Обсуждаются научная новизна, научная и практическая значимость, полученных в ходе выполнения диссертации, научных результатов. Кратко описываются объекты и методология исследований. Формулируются положения, выносимые на защиту. Проводится оценка личного вклада автора в полученные результаты. Оценивается степень достоверности полученных результатов, а также приводится список конференций, на которых полученные результаты были представлены. Приводится структура диссертации, а также краткое содержание глав диссертационной работы.

В первой главе описываются основные проблемы проекционной рентгеновской литографии и возможные методы их решения, которые приводятся в диссертации. Также в главе описываются физические основы экспериментальных методов исследования и технологическое оборудование, которое использовалось при исследовании и росте многослойных зеркал и пленок.

Вторая глава посвящена изучению физических и оптических характеристик многослойных зеркал, предназначенных для работы в проекционной рентгеновской литографии нового поколения на длине волн в окрестности 11 нм. Изучена внутренняя микроструктура МРЗ Мо/Ве, установлены составы переходных слоев на каждой границе раздела. Установлена зависимость внутренней микроструктуры и коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм от режимов изотермического вакуумного отжига. Показана возможность повышения коэффициента отражения на рабочей длине волны при определенном режиме отжига. Изучены оптические свойства МРЗ Ru/Ве и МРЗ Ru/Ве с буферными слоями Мо на границах раздела. Установлена зависимость коэффициента отражения и спектральной полосы отражения МРЗ Ru/Ве от толщин буферных слоев Мо на обеих границах. Получено рекордное значение коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм, которое составило $R=72.2\%$ при $\Delta\lambda=0.38$ нм. Установлено, что внедрение буферных слоев в МРЗ Ru/Ве позволило получить временную стабильность отражательных характеристик как минимум в течении двух лет. Получены околонулевые значения внутренних напряжений и доказано существование бесстрессового состояния в МРЗ Ru/Ве с буферными слоями Мо на обеих границах раздела одновременно, при значении отражательной способности не ниже 71%. Проведено сравнение оптической эффективности литографических установок на длинах волн 13.5 нм (МРЗ Мо/Si) и 11.2 нм (МРЗ Мо/Ве и Ru/Ве). Показано, что оптическая эффективность 12-ти зеркальной литографической установки на основе МРЗ Ru/Ве на длине волны 11.2 нм на 36% выше, чем у установки на основе МРЗ Мо/Si на длине волны 13.5 нм.

Третья глава посвящена поиску, синтезу и изучению оптических и физических характеристик МРЗ, предназначенных для осаждения на поверхность динамической маски – матрицы микрозеркал для безмасочной рентгеновской литографии. Исследованы зависимости коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм и внутренних механических напряжений в МРЗ Мо/Ве/Si от толщины слоев кремния в периоде. Обнаружено, что

достигаются высокие, на уровне 66-67%, коэффициенты отражения при «нулевых» значениях механических напряжений. Осуществлен поиск новых отражающих покрытий, сочетающих в себе диэлектрические свойства, «нулевой» уровень внутренних напряжений и высокие коэффициенты отражения на длине волны 13.5 нм. Найдено оптимальное МРЗ Si/C, которое обеспечивает коэффициент отражения $R \sim 11\%$.

В четвертой главе изучены свойства коммерчески доступной матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600. Отработана методика нанесения на МЭМС микрозеркал диэлектрических, бесстрессовых МРЗ C/Si, отражающих рентгеновское излучение на длине волны 13.5 нм. Изучена долговременная стабильность работы МЭМС. Проведено облучение МЭМС излучением с длиной волны около 13.5 нм, подтвердившее сохранение ее работоспособности. Обсуждаются проблемы применения этого типа МЭМС для создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. Методы изготовления и исследование многослойных зеркал

1.1. Проблемы проекционной литографии

В последнее время прорывные результаты в естественных науках, технике и технологии часто ассоциируются с развитием, так называемых, нанотехнологий. Ключевым звеном этих технологий является наноструктурирование вещества – искусственное получение физических объектов, у которых, как минимум, один из размеров меньше 100 нм, что существенно влияет на его физические свойства, например, [14]. Среди разнообразия методов наноструктурирования необходимо выделить фотолитографию, обеспечивающую наивысшую степень регулярности и точности воспроизведения размеров наноструктур. По сути, весь прогресс микро- и нано- электроники напрямую определялся развитием литографии, как наиболее производительного способа формирования микро- и наноструктур.

Для своего функционирования литография предполагает очень развитую инфраструктуру – это и оборудование, и методы, и технологии. Наиболее сложными и дорогостоящими элементами этой инфраструктуры являются маски, затраты на которые в стоимости производства чипов удваиваются с переходом на новые (уменьшающиеся) технологические нормы [15-17]. Набор масок только при производстве одного чипа может стоить от нескольких десятков до сотен миллионов рублей. Поэтому, из-за высокой стоимости оборудования, дороговизны масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры, проекционная фотолитография становится конкурентоспособной только при массовом производстве. Иными словами – для этой технологии требуется глобальный рынок. ЭУФ литография требует еще больших затрат как на оборудование, так и на его эксплуатацию. Тем не менее, начиная с топологических размеров от 16 нм и менее она существенно дешевле, чем традиционная фотолитография. Однако отмеченные недостатки делают эту

технологии доступной только для единичных глобальных игроков (Intel, Samsung, TSMC, Global Foundries).

Уже на первых экспериментальных литографических установках с длиной волны 13.5 нм было получено пространственное разрешение, ограниченное дифракцией и не уступающее, на тот момент времени, разрешению более совершенных литографических установок, работающих на длине волны 193 нм [18,19]. В [20] показано, что, начиная с разрешения 32 нм, стоимость EUV литографического процесса становится меньше, чем 193i. Это преимущество кратно возрастает при уменьшении топологических норм, поскольку не требуется многократное рисование. В настоящее время ее уже используют при производстве критических слоев чипов [21-23]. В частности, EUV литографическая установка последнего поколения от компании ASML TWINSCAN NXE:3400D с проекционным объективом $NA=0.33$ имеет производительность до 160 пластин Ø300 мм в час и обеспечивает разрешение 13 нм [24].

Меньшая рабочая длина волны позволяет уменьшить число операций при производстве чипов, тем самым снизить стоимость литографического процесса. Однако, продвижение в область суб-10 нм топологий так же затруднено. Для поддержки технологических норм 8-9 нм, отмеченных в [22,23] потребовалось прибегнуть к технологии двойного рисования, что, как минимум на этой стадии, вдвое увеличивает число технологических операций и, соответственно, снижает производительность литографического процесса. Попытки избежать двойного рисования за счет увеличения числовой апертуры проекционного объектива натолкнулись, как на технологические проблемы изготовления более светосильных объективов, так и на фундаментальную проблему, связанную с затенениями на маске. Это связано с тем, что для достижения суб-10 нм разрешения требуется проекционный объектив с числовой апертурой $NA>0.5$. Большая выходная апертура предполагает и относительно высокую (до 0.12) входную числовую апертуру объектива. А с учетом того, что маски для EUV литографии 3-х мерные, при больших углах проявляются эффекты затенение

рисунка маски, не позволяющие получать качественные изображения. В настоящее время над этой проблемой активно работают. В частности, в ZEISS разрабатывается уникальный объектив, имеющий различные увеличения (5х и 8х) в перпендикулярных плоскостях [24].

Ключевым недостатком проекционной литографии является использование большого числа дорогостоящих масок. Необходимость изготовления комплекта уникальных масок приводит к длительным задержкам от момента заказа до изготовления интегральной схемы. Другой проблемой, связанной с масками, является сильная зависимость стоимости чипа от объемов производства. Поэтому технология проекционной УФ (ЭУФ) литографии становится экономически оправданной только при массовом производстве - от миллиона и более чипов в год.

На практике рынок микро- и нано- электроники требует не только массового, но также средне- и мелкосерийного производства. Средне- и мелкосерийные производства актуальны для научных и прикладных исследований, а также и военной отрасли. Поэтому проблема отсутствия средне- и мелкосерийного производства микро- и нано-электроники является крайне актуальной мировой проблемой.

В качестве решения данной проблемы может выступать безмасочная рентгеновская литография. Из известных методов безмасочной литографии для производства СБИС с нанометровыми нормами может быть использована только многопучковая электронная литография. Однако, несмотря на многолетние исследования в этом направлении, ведущиеся в мире, создать такой литограф для индустрии пока не удалось. Поэтому проблема развития безмасочной литографии остается актуальной задачей для обеспечения изготовления СБИС, в частности необходимых при создании вооружения, военной и специальной техники, в которых в основном используются ограниченные партии комплектующих.

В качестве перспективной альтернативы представляется БМРЛ. В этой технологии пространственное разрешение обеспечивается достаточно короткой

длиной волны (от 13.5 нм и ниже), а функцию масок выполняют МЭМС микрозеркал, управляемые электрическими сигналами. Развитие этой технологии сдерживается отсутствием на рынке МЭМС, отражающих рентгеновское излучение.

В качестве МЭМС для изучения возможности создания динамической маски на длину волны 13.5 нм в данной работе, на базе коммерчески доступных МЭМС, было выбрано микрозеркальное устройство DLP6500FLQ, производства Texas Instruments [25]. Это устройство предназначено для работы в видимой и ультрафиолетовой частях спектра. Оно состоит из множества микрозеркал, размером $\sim 7 \times 7$ мкм, толщиной порядка несколько сотен нанометров, каждое из которых может независимо выходить из отражающего положения путем отклонения от изначального состояния на 12 градусов.

В диссертационной работе исследовалась возможность нанесения на коммерчески доступные МЭМС МРЗ, отражающих излучение в окрестности длины волны 13.5 нм.

Другой задачей является исследование возможности продвижения в область длин волн короче 13.5 нм с точки зрения достижения коэффициентов отражения зеркал не менее 70% для литографии следующего поколения.

1.2 Многослойные рентгеновские зеркала для спектральной области 11.2 – 13.5 нм

1.2.1 МРЗ для 11.2 нм

Интерес к МРЗ на основе Mo/Be и Ru/Be пробудился в 1990-х годах и был связан с планами по развитию проекционной литографии в мягком рентгеновском диапазоне [26-29]. Выбор осуществлялся между рабочими длинами волн 11.2 нм и 13.5 нм. В этот период уделялось большое внимание изучению МРЗ Mo/Be и Ru/Be, оптимизированных на окрестность длины волны 11.2 нм [30-32]. При этом, на длине волны 11.3 нм при нормальном падении от МРЗ Mo/Be был получен рекордный коэффициент отражения 70.2%. Однако,

спектральная полоса отражения была более чем в 2 раза уже по сравнению с МРЗ Mo/Si, что делало эту систему крайне неэффективной в составе двенадцати зеркальной рентгенооптической системы.

Зеркала Ru/Be имели в полтора раза большую полосу пропускания $\Delta\lambda=0.34$ нм, чем МРЗ Mo/Be, однако их коэффициент отражения был низким, на уровне 63% [31]. Также, исследовались оптические характеристики системы $\text{Mo}_x\text{Ru}_{1-x}/\text{Be}$ [32], где использовалась составная мишень из Mo и Ru. Коэффициент отражения достиг 69.3%, при спектральной ширине 0.35 нм. Данная система обладала большой спектральной шириной, как и система Ru/Be, при чуть менее низком значении коэффициента отражения, чем система Mo/Be. Тем не менее, и эти зеркала оказались существенно менее эффективными в многозеркальной системе по сравнению с Mo/Si. Поэтому, в то время, приоритет был отдан литографии с рабочей длиной волны 13.5 нм и оптике на основе кремния.

Тем не менее, теоретические оценки указывают на то, что эффективность системы из 12 зеркал Ru/Be, оптимизированных на $\lambda=11.2$ нм, вдвое выше, чем для зеркал Mo/Si на 13,5 нм, что говорит о предпочтительности развития технологии литографии с рабочей длиной волны 11.2 нм [7]. Однако разработке многозеркальных проекционных схем должно предшествовать изучение возможностей создания высокоэффективных зеркал нормального падения, оптимизированных на $\lambda=11.2$ нм.

Прекращенные в начале 2000-х годов работы по изучению свойств бериллий-содержащих МРЗ были возобновлены в 2014 году в ИФМ РАН, где создана уникальная бериллиевая лаборатория [33]. В ходе исследований, на длине волны 11.3 нм для МРЗ на основе Mo/Be был получен коэффициент отражения 70.3% [34], что немного выше, чем результаты, опубликованные ранее [30].

Следует отметить, что теоретическим пределом для МРЗ Mo/Be на данной длине волны является 76 %. Основной причиной несоответствия теоретического предела достигнутым на практике значениям отражательной

способности являются уширенные переходные области на границах раздела между материалами системы. Внедрение методики барьерных слоев [34] не привело к улучшению отражательной способности МРЗ. Однако в этом исследовании было показано, что кремниевый буферный слой приводит к сглаживающему эффекту, т.е. к уменьшению величины межслоевой шероховатости.

Важным преимуществом МРЗ Mo/Be над Mo/Si является их высокая термическая стойкость. В работах [35] показано, что вплоть до температур 350°C МРЗ Mo/Be сохраняют отражательные свойства. Более того, при определенных режимах отжига наблюдается некоторое увеличение коэффициента отражения (порядка абсолютного 1%).

Тем не менее, и в данном случае теоретический предел отражения не достигнут. Проблема связана не только с наличием геометрической шероховатости на границах раздела, но также с возможным образованием в пограничных областях химических соединений материалов слоев - бериллидов. И если вопрос образования силицидов молибдена в системе Mo/Si уже изучался [36-39], то изучение бериллидов и вообще структуры границ в тонкопленочных периодических системах на основе Mo/Be практически не проводилось.

В свою очередь, систематические исследования МРЗ Ru/Be, прекращенные в начале 2000-х, до данной диссертационной работы вообще не проводились.

1.2.2 МРЗ для 13.5 нм

Интерес к МРЗ Mo/Si возник еще в 1980-х годах начиная с работы [40] и с тех пор не ослабевает. Это связано с тем, что именно МРЗ Mo/Si позволили обеспечить в совокупности и максимально возможную отражательную способность, и самое большое значение спектральной ширины на длине волны 13.5 нм. Это и обеспечило выбор именно этой пары материалов для работы в качестве оптики для ЭУФ литографии на длине волны 13.5 нм. МРЗ Mo/Si для диапазона длин волн вблизи 13 нм изучались, например, в [36, 37, 41-44].

Величина пикового коэффициента отражения достигает 68% при теоретическом пределе в 74%. Основной причиной отличия экспериментальных результатов от теоретического расчета является наличие протяженных переходных областей на границах раздела между материалами структур – MoSi_2 [36-39]. При этом отмечена асимметрия переходных областей. В случае осаждения кремния на молибден ширина оценивается как 0.5-0.6 нм, в случае осаждения молибдена на кремний 1-1.2 нм.

Наиболее эффективным методом снижения протяженности зоны перемешивания материалов признано нанесение между молибденом и кремнием антидиффузионных слоев третьего материала. В работах [38, 47 и 48] изучалось влияние антидиффузионных слоев C, SiC и B_4C на коэффициент отражения МРЗ Mo/Si. Лучшие результаты, как и следовало из оценки ширин переходных областей, достигаются при осаждении барьерного материала на поверхность кремниевых слоев. Толщина анти-диффузионного слоя определяется как 0.2-0.3 нм. Для случая углерода достигнут $R=69.6\%$, для карбида бора $R=70.15\%$ на $\lambda = 13.5$ нм.

Рекордное значение коэффициента отражения было получено в МРЗ Mo/Si с добавлением Be, оптимизированной на окрестность длины волны 13.5 нм. Экспериментально достигнуты значения пикового коэффициента отражения $R=71.9\%$ на 13.5 нм при 77.1° , и $R=72.8\%$ на 12.9 нм при 68.7° [47]. При отражении под нормальным падением (88°), отражательная способность на длине волны 13.63 нм составила 71.1%, что превосходит классические МРЗ Mo/Si. Данный рекорд удалось получить за счет того, что границы раздела с добавлением Be слоя значительно улучшились, а оптически, в окрестности длины волны 13.5 нм, Si и Be очень близки, что позволяет без сильных ухудшений отражательных характеристик замещать их друг на друга. Единственным недостатком этой системы является более узкая спектральная полоса пропускания, 0.48 нм против 0.54 нм. Однако узкая полоса отражения объясняется большой толщиной, более 2 нм, слоя Be. Расчеты показывают, что

использование Be в качестве тонкой прослойки сохранит рекордный коэффициент отражения при одинаковой спектральной полосе отражения.

1.2.3 Внутренние напряжения в МРЗ

Немаловажной проблемой у отражающих покрытий является наличие внутренних напряжений, которые неизбежно приводят к деформации подложки, на которую они осаждаются. Эта проблема встает, например, при создании объективов, обеспечивающих дифракционное качество изображений. Для обеспечения дифракционной разрешающей способности объектива абберации волнового фронта должны быть меньше $\lambda/14$, то есть на длине волны 13.5 нм или меньше они переходят в суб-нанометровую область [47]. А внутренние напряжения в осаждаемых на подложки отражающих структурах способны искажать их форму, что может свести на нет всю работу по формированию поверхности дифракционного качества и не позволит достичь требуемого разрешения объектива. Расчет деформации подложки можно провести по формуле [11]:

$$\delta x = \frac{3 \cdot s \cdot h_f}{4 \cdot Y} \cdot \left(\frac{D}{d_{\text{sub}}} \right)^2, \quad Y = \frac{E}{1 - \nu} \quad (1.1)$$

где E — модуль Юнга материала подложки (130 ГПа для Si (100) [48]), ν — коэффициент Пуассона материала подложки (0.28 для Si (100) [48]), s — напряжение, h_f — толщина отражающего покрытия, d_{sub} — толщина подложки, D — диаметр подложки.

По формуле (1.1), для отношения $d_{\text{sub}}/D \sim 0.3$, характерного для высокоточной оптики, максимальная деформация для отражающего покрытия Mo/Si, толщиной 350 нм, составит ~ 7.3 нм, что существенно превышает допустимые деформации. И данный пример не единственный, где недопустимо искажение поверхности подложки.

Еще более остро эта проблема стоит при нанесении покрытий на микрозеркала МЭМС, у которых толщина микрозеркала составляет

0.2-0.3 мкм – на уровне толщины отражающего покрытия или даже меньше, где коэффициент $d_{\text{sub}}/D \sim 0.04$.

Вопрос об уменьшении внутренних напряжений изучался во многих работах. Так, в работах [49-52] авторы изучали влияние параметров технологического процесса на величину внутренних напряжений в сплошных пленках молибдена. К таким параметрам, прежде всего, относятся – ток магнетронного разряда, напряжение разряда и давление рабочего газа в камере. В работах было установлено, что основной эффект на внутреннее напряжение оказывает значение электрического напряжения разряда. Увеличение напряжения повышает энергию конденсирующихся атомов, что позволяет им глубже проникать в пленку, вызывая дополнительные внутренние напряжения.

Также, к параметрам технологического процесса относится и такой немаловажный фактор как давление остаточных газов в камере. В работе [53] авторы изучили зависимость внутренних напряжений в МРЗ Mo/Si от остаточной атмосферы в вакуумной камере. Результатом этой работы стал вывод о том, что рост доли примесей в материалах зеркала приводит к растягивающему эффекту.

В работах [54, 55] рассматриваются два метода снижения величины внутренних напряжений в МРЗ Mo/Si. Первый метод в [54] – отжиг МРЗ после их изготовления. Однако, отжиг МРЗ в большинстве случаев приводит к необратимому ухудшению зеркала – увеличению уровня шероховатости межслоевых границ и химическому взаимодействию материалов, из которых состоит многослойная система. Все это негативно влияет на отражательные характеристики. В работе [55] автор искал баланс между двумя конкурирующими эффектами за счет термического отжига – уменьшение внутренних напряжений (положительный эффект) и уменьшение отражательных характеристик (отрицательный эффект).

В работе [31] было предложено воздействовать не на само отражающее покрытие, а избавляться от деформации подложки, которую оно вызывает. Для достижения такого эффекта, перед нанесением МРЗ Mo/Si на подложку

наносилась, так называемая, структура «анти-стресс» Mo/Be, которая имеет противоположный знак внутренних напряжений. Правильным подбором параметров буферной структуры возможно добиться практически полной компенсации внутренних напряжений. При этом автор отмечает незначительное падение отражательной способности.

Стоит отметить, что данный метод избавления от деформации активно применяется в ИФМ РАН при изготовлении отражающей оптики. В каждом конкретном случае для осаждаемого отражающего покрытия подбирается структура «анти-стресс», которая обладает обратным знаком внутренних напряжений.

Важное замечание для данных способов избавления от внутренних напряжений – все эти способы в большей или меньшей степени влияют на отражательные характеристики МРЗ.

Также стоит отметить, что есть определенные задачи, в которых невозможно применить ни один из методов компенсации напряжений. Одна из таких задач – осаждение отражающего покрытия на сверхтонкие подложки, соизмеримые по толщине с отражающим покрытием, например, на матрицу микрозеркал (подробнее в главе 4). В данном случае, невозможно применить метод осаждения структуры «анти-стресс». Не трудно показать теоретически, и этот эффект мы подтвердили экспериментально, осаждение предварительно структуры «анти-стресс» приведет к пластическим деформациям поверхности микрозеркал, и эти искажения исправить невозможно. Также невозможно и избавление напряжений методом отжига при высоких температурах. При осаждении напряженной структуры на поверхность микрозеркал, искривление микрозеркала будет неисправимо. В этой связи, есть задачи, в которых необходимо получение изначально ненапряженных отражающих покрытий.

1.3 Оборудование и методы синтеза и изучения свойств исследуемых покрытий

1.3.1 Установка для синтеза многослойных зеркал и пленок

Все структуры – тонкие пленки и многослойные системы, которые рассматриваются в данной работе, были изготовлены на установке магнетронного напыления в специализированной бериллиевой лаборатории ИФМ РАН (рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Фото установки магнетронного осаждения в специализированной бериллиевой лаборатории ИФМ РАН.

Для защиты человека от бериллия, бериллиевая лаборатория оснащена вытяжной системой вентиляции над установками магнетронного осаждения и приточно-вытяжной системой вентиляции воздуха внутри помещения. Вытяжная система вентиляции над установками магнетронного напыления служит для оттока возможных частиц Be вверх от установки в систему вентиляции, с задержкой возможных частиц Be в системе фильтров. Приточно-вытяжная система вентиляции воздуха служит для обмена воздуха внутри помещения. Скорость притока и оттока воздуха настроена таким образом, что достигается трехкратный обмен всего объема воздуха внутри помещения в течении часа. Вытяжная система вентиляции включается во время открытия вакуумного объема напылительной установки, а приточно-вытяжная – после закрытия вакуумного объема и работает минимум час для полной замены воздуха внутри помещения. Также, для защиты человека от бериллия, оператор установки использует личные средства защиты органов дыхания – специализированные респираторы с фильтрами от мелкодисперсной пыли.

Общая схема установки магнетронного напыления включает пост откачки, вакуумную камеру, блок электроники и персональный компьютер с установленной программой управления. Схематическое изображение вакуумной камеры напылительной установки приведено на рисунке 1.2.

Данная установка имеет 4 магнетрона, что позволяет осуществлять осаждение до 4-х материалов в одном технологическом цикле одновременно. Остаточное давление газов в рабочей камере перед процессом осаждения пленок и отражающих покрытий не хуже $2.0 \cdot 10^{-7}$ Торр. В качестве рабочей среды используется высокочистый (99.998%) газ аргон, а также смесь из двух газов. В смеси газов в обязательном порядке имеется аргон, а вторым газом в данной работе выступали – азот, кислород и водород. Рабочее давление газа при технологическом процессе в разных экспериментах менялось от $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Торр до $\sim 1.2 \cdot 10^{-2}$ Торр.

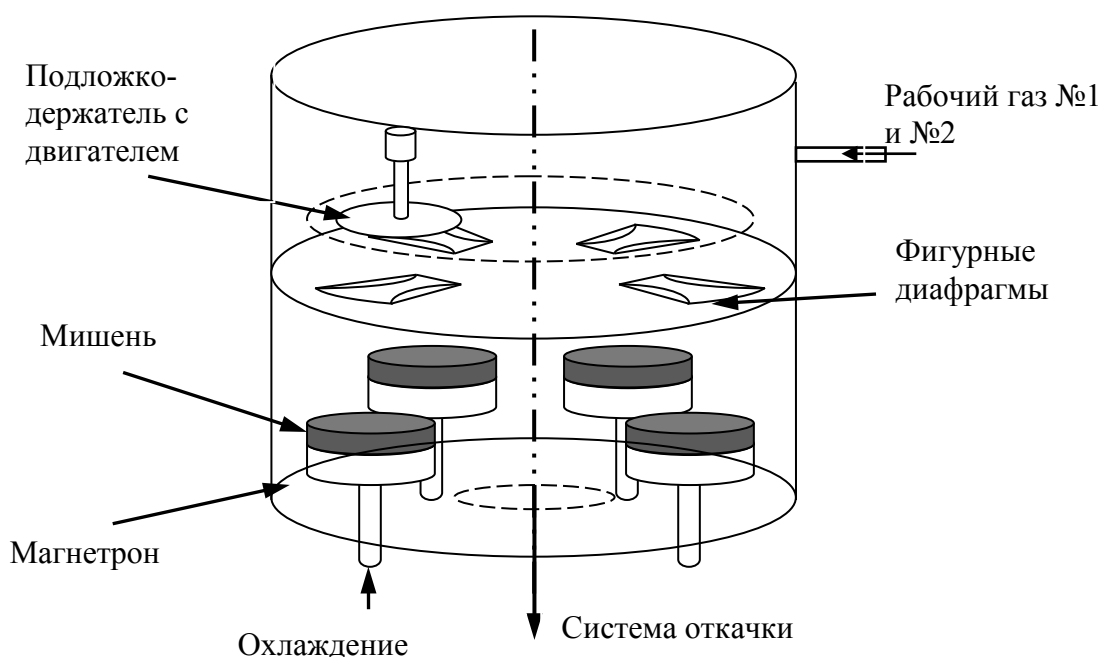


Рисунок. 1.2 – Схема установки магнетронного напыления.

Постоянное значение давления рабочего газа, во время осаждения МРЗ и пленок материалов, контролировалось при помощи регуляторов расхода газа РРГ-12 и постоянным измерением значения давления газа вакуумным датчиком Pfeiffer PKR 251. РРГ-12 обеспечивает постоянный поток газа в камеру с высокой точностью. Регулятор имеет собственную систему обратной связи для поддержания постоянного значения потока при изменении внешних параметров – изменение входного давления газа в регулятор и изменение температуры.

Для подачи питания на магнетроны, используются источники питания собственного производства ИФМ РАН. Нестабильность выходного тока в источниках питания не превышает 0.01% при изменении сетевого напряжения на $\pm 10\%$ и также составляет порядка 0.01-0.02% при изменении тока нагрузки в 10 раз. Значения подаваемого тока на магнетроны в данной напылительной установке могут варьироваться в пределах от десятков до 1500 мА, значения напряжений при этом находятся в пределах 100 – 400 В в зависимости от распыляемого материала. Максимальный предел 1500 мА ограничен возможностью системы охлаждения магнетронов, а не источников питания. В

диссертационной работе максимальное значение подаваемого тока составляло 800 мА, минимальное – 100 мА.

Охлаждение магнетронов осуществляется путем постоянной подачи охлажденной воды в трубки охлаждения внутри магнетронов с последующим выводом нагретой воды в систему охлаждения. Температура подаваемой воды составляет 13°. Охлаждение воды осуществляется с помощью промышленного холодильника (чиллер) ENR.002 производства НІТЕМА (Италия).

МРЗ и пленки материалов осаждались на гладкие (величина среднеквадратичной шероховатости ~ 0.2 нм) кремниевые подложки, толщинами 300 и 450 мкм. Исходный диаметр подложек 100 мм. Перед осаждением экспериментальных образцов МРЗ и пленок материалов, подложки предварительно нарезались на кусочки, размеры которых варьировались: 5x25 мм, 25x25мм, 15x60 мм, 25x90 мм. Различные размеры подложек необходимы для различных исследований. После резки, проводилась химическая чистка подложек от загрязнения в результате резки.

В ходе процесса синтеза МРЗ и пленок материалов, подложка крепится на подложкодержатель, расположенный над магнетронами. Подложкодержатель представляет собой диск, диаметром 200 мм, толщиной 4 мм, прикрепленный, через систему креплений, к центральной оси напылительной установки. Также, к этой системе креплений, устанавливается двигатель, который позволяет подложкодержателю осуществлять вращение вокруг своей оси. Вращение подложкодержателя вокруг своей оси позволяет получить центрально-осевую симметрию осажденного покрытия на подложке. Подложка на подложкодержателе осуществляет круговые движения по или против часовой стрелке, относительно оси напылительной установки, последовательно проходя над работающими магнетронами. Толщины пленок материалов контролируются током разряда на магнетроне и временем нахождения подложки над магнетроном. Изменяя значения тока разряда и время прохождения можно изменять скорость осаждения распыляемого материала на подложку.

Для достижения того, чтобы угол отражения от МРЗ на целевой длине волны в каждой точке на подложке соответствовал заданному (одно значение угла на всей поверхности или необходимое распределение углов по поверхности подложки), необходимо, чтобы в каждой точке подложки было заданное значение периода отражающего покрытия (толщин пленок материала). Для достижения этого, перед осаждением отражающего покрытия на готовую подложку, производится процедура вывода «распределения». Под понятием «распределение» подразумевается отличие в значении толщины отражающего покрытия в разных точках на подложке от наперед заданного значения.

После напыления МРЗ или пленки на подложку, проводится измерение подложки по длине в координатах: $r=0\text{мм}$, $r=10\text{мм}$, $r=20\text{мм}$, ... По результатам измерения определяются значения периода МРЗ или толщины пленки материала в зависимости от координаты. При необходимости, если определенное значение периода МРЗ или толщины пленки не удовлетворяет заданному распределению, производится коррекция профиля фигурных диафрагм. На рисунке 1.3 приведены фотографии характерной фигурной диафрагмы и ее расположение в камере установки магнетронного осаждения над распыляемой мишенью.



Рисунок 1.3 – фотографии характерной фигурной диафрагмы (слева) и ее расположение в камере установки магнетронного осаждения над распыляемой мишенью (справа).

Фигурные диафрагмы позволяют изменять распределение осаждения материала на подложку. Изменяя форму и размеры диафрагмы и расстояние между лепестками диафрагмы в определенных, по результатам измерений, точках можно добиться необходимого распределения осаждения толщины материала на поверхности подложки.

1.3.2 Методика исследований МРЗ с помощью рентгеновской дифракции и рефлектометрии

Изучение характеристик тонкопленочных покрытий методом малоугловой рентгеновской дифракции производились с помощью высокоразрешающего четырехкристального дифрактометра Philips X'Pert PRO (Philips Analytical, Нидерланды). Работа производилась на линии Cu $K\alpha_1$, длина волны 0.15406 нм, угловая расходимость 0.0053° , ширина зондового пучка 50 мкм, вертикальный размер зондового пучка мог изменяться в пределах 1 – 10 мм. Ширина щели на детекторе могла изменяться в пределах 100-800 мкм, высота щели – 2 мм, 6 мм или 20 мм. Для измерения малоугловой рентгеновской дифракции в широком диапазоне углов (измерение до уровня шумов) использовался вертикальный размер щели зондового пучка 10 мм, вертикальный размер щели на детекторе 20 мм, ширина щели на детекторе 800 мкм. При таких размерах щелей достигается максимальная интенсивность сигнала при сохранении высокой точности измерения. Для измерения малоугловой рентгеновской дифракции в узком диапазоне углов (для измерения распределения толщин по координатам) использовался вертикальный размер щели зондового пучка 2 мм, вертикальный размер щели на детекторе 2 мм, ширина щели на детекторе 800 мкм. При таких размерах щелей достигается минимально возможный вертикальный размер измеряемой области, при сохранении достаточного уровня интенсивности сигнала и точности измерения. Шаг сканирования варьировался в пределах 0.002° - 0.005° . Для измерения диффузного рассеяния в области первого брэгговского максимума использовалась схема «качания образца» - угловое

положение детектора фиксировалось и оставалось постоянным, а угловое положение образца изменялось в широком диапазоне углов. Для измерения диффузного рассеяния использовался вертикальный размер щели зондового пучка 10 мм, вертикальный размер щели на детекторе 20 мм, ширина щели на детекторе 100 мкм. При такой ширине щели в детектор (вне брэгговского максимума) попадает сигнал, отраженный от шероховатостей. Точность определения абсолютного значения угла 0.001° . Подробнее о приборе и его характеристиках можно найти в [56].

Рефлектометрия в диапазоне длин волн 11-14 нм проводилась на лабораторном рефлектометре, разработанном и изготовленном в ИФМ РАН [57] и синхротронном центре BESSY-II [58]. Лабораторный рефлектометр в качестве источника непрерывного рентгеновского излучения использовал плазму, генерируемую при воздействии мощного лазерного импульса на твердотельную мишень. Для монохроматизации зондового пучка использовался спектрометр-монокроматор с плоской дифракционной решеткой по схеме Черни-Тернера. Спектральное разрешение монокроматора составляло около 0.03 нм, размер зондового пучка на образце менее 1 мм, угловая расходимость на уровне 0.05° . Подробнее о принципах построения и технических характеристиках прибора можно найти в [59].

Реконструкция параметров тонкопленочных систем по данным рентгеновского отражения на разных длинах волн производилась с использованием программного пакета Multifitting [60]. Для описания переходного слоя использовалась линейная комбинация нескольких функций, а именно: функция ошибок (erf), линейная функция (lin) и экспоненциальная (exp). При обработке Ru/Be зеркал с тонкими буферными слоями Mo, дополнительно использовалась градиентная модель интерфейса, шаг дискретизации задавался 0.1 нм. Более подробное описание модели можно найти в [61].

Микроструктуру пленочных материалов, а также возможное образование кристаллических фаз на границах раздела исследовали методом широкоуговой

дифракции на дифрактометре Bruker D8 Discover (Bruker AXS, Германия). Обработка результатов измерений проводилась с использованием программных пакетов DIFFRAC.EVA и DIFFRAC.Leptos компании Bruker AXS.

1.3.3 Методика исследований МРЗ с помощью РФЭС, комбинационного рассеяния, ВИМС, РФА и АСМ

Измерения рентгеновских фотоэлектронных спектров проводились на фотоэлектронном спектрометре Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi [62], лабораторном модуле ESCA экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона «КИСИ-Курчатов» [63] и на экспериментальной станции RGL-PES установленной на российско-германском канале вывода синхротронного излучения накопительного кольца BESSY-II [64].

Измерение спектров комбинационного рассеяния проводились на спектрометре T64000 Horiba Jobin Yvon, соединенном с микроскопической приставкой. Подробнее о схеме и проведении эксперимента можно найти в [65].

Распределение химических элементов в многослойных зеркалах по глубине с разрешением до 1 нм производилось масс-спектрометром вторичных ионов TOF.SIMS 5 (ION-TOF, Германия) по методике, описанной в [66, 67].

Элементный анализ МЭМС в разных координатах микрозеркал определялся методом рентгенофлуорисцентного анализа (РФА) на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss SUPRA 50 VP.

Исследования шероховатости, формы поверхности и размерных параметров МЭМС микрозеркал производились с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Ntegra Prima (NT-MDT) на стенде [68]. Обработывались кадры размером 2x2 и 40x40 мкм, число точек в строке – 256, что позволяет перекрывать диапазон пространственных частот $\nu=[4.9 \cdot 10^{-2}-6.3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1}]$.

1.3.4 Методика исследований МРЗ с помощью EXAFS спектроскопии

Измерение спектров XANES и EXAFS вблизи К-края поглощения Мо выполнено на станции СТМ Курчатовского центра синхротронного излучения.

Энергетическое разрешение $\Delta E/E \sim 2 \cdot 10^{-4}$, размер пучка на образце 3×1 мм², монохроматор – прорезной монокристалл кремния с отражающей поверхностью (220), для детектирования флуоресцентного излучения использовался SDD детектор Amptek. Образец стоял перпендикулярно излучению. Излучение проходит сквозь исследуемый образец. После образца излучение проходит ионизационную камеру, эталон и следующую ионизационную камеру. В качестве эталона использовался прессованный порошок чистого Мо. Спектр поглощения исследуемого образца определялся по выходу флуоресценции, а эталона - исходя из разницы излучения в двух ионизационных камерах до и после прохождения эталона. Подробнее о схеме и проведении EXAFS эксперимента можно найти в [69, 70].

Определение структурных параметров из спектров EXAFS выполнено путем подгонки расчетных спектров к экспериментальным. Для этого использовался пакет программ IFFEFIT [71]. После стандартной процедуры вычитания предкраевой фоновой кривой, нормализации спектра и выделения осциллирующей части спектра, путем варьирования межатомных расстояний, координационных чисел и параметров Дебая-Валлера выполнена подгонка расчетного спектра к экспериментальному. Параметры, необходимые для расчета EXAFS спектра (длина свободного пробега фотоэлектрона, амплитуда рассеяния и величина фазового сдвига при рассеянии фотоэлектрона на атомах окружения) рассчитаны программой FEFF6 [72].

Теоретические расчеты XANES спектров, измеренных на К-крае Мо, выполнены методом конечных разностей (FDM), как это реализовано в программе FDMNES [73, 74]. Выполнен самосогласованный расчет электронной плотности с обменно-корреляционным потенциалом в приближении локальной плотности [75]. Плотность электронных состояний возбужденного атома найдена с учетом полной экранировки дырочного состояния. Расчет выполнен для атомных кластеров радиуса 0.5 нм, построенных на основании кристаллографических данных для фаз MoBe₂, MoBe₁₂ и MoBe₂₂ [76]. Расчет спектра поглощения проводится путем свертки

плотности незанятых электронных состояний с кривой Лоренца. При этом, наилучшее согласие расчета с экспериментом достигается, когда ширина кривой Лоренца зависит от энергии как арктангенс [77].

1.3.5 Методы определения внутренних напряжений

Расчет значения напряжений основан на свойстве системы «подложка + пленка» изгибаться при наличии напряжений. Радиус кривизны подложки и системы «подложка + пленка» может быть измерен, а значение напряжения определено по формуле Стоуни:

$$s = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{sub}^2}{d_f} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad (1.2)$$

где, s – напряжения, E – модуль Юнга материала подложки, ν – коэффициент Пуассона материала подложки, d_{sub} – толщина подложки, d_f – толщина многослойной пленки, R_1 – исходный радиус кривизны подложки, R_2 – радиус кривизны подложки после осаждения отражающего покрытия.

Данную формулу можно применять при соблюдении следующих условий [78]:

- толщина пленки много меньше толщины подложки ($d_f \ll d_{sub}$);
- длина пластины (l) много больше ширины пластины (b) ($l \gg b$).

В качестве исходной пластины использовались подложки из монокристаллического кремния с ориентацией (100), размерами $\sim 15 \times 60$ мм, толщинами 300 мкм и 450 мкм. Для Si(100): $E=130$ ГПа, $\nu=0.28$ [48], тогда коэффициент:

$$\frac{E}{6(1-\nu)} = 30 \text{ ГПа} \quad (1.3)$$

Определение значения внутренних напряжений сводится к определению радиусов кривизны подложки до и после осаждения на нее отражающего покрытия. Радиус кривизны подложки определялся на оптическом стенде по изменению расстояния между отраженными от подложки, исходно

параллельными лазерными лучами. Схема измерения радиуса кривизны на оптическом стенде приведена на рисунке 1.4.

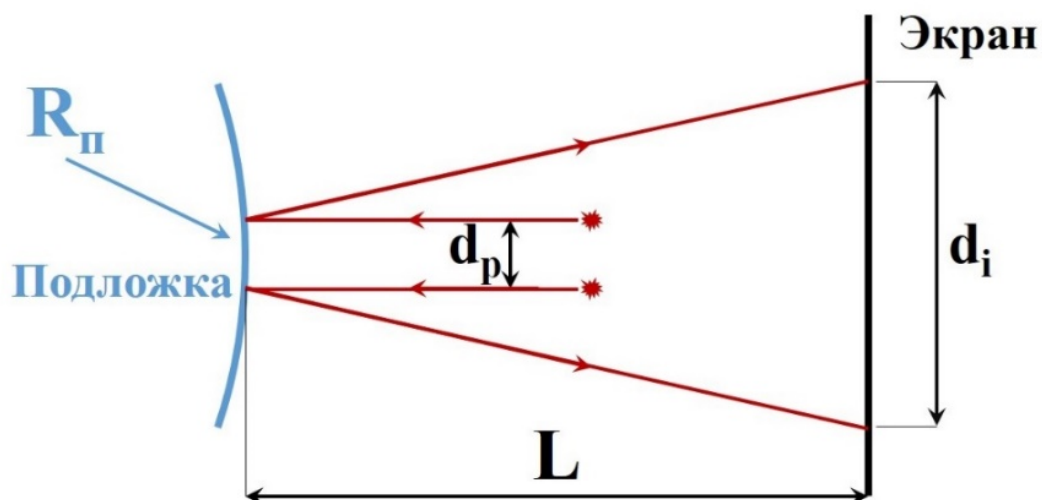


Рисунок. 1.4 – Схема эксперимента по измерению радиуса кривизны подложки. d_p и d_i – расстояние между лазерными лучами до и после отражения от подложки, соответственно.

Лазерный луч, проходя через призму, создает два параллельных лазерных луча, которые падают на образец и отражаются от него. В зависимости от знака напряжения (растягивающие или сжимающие напряжения) отраженные лучи сходятся или расходятся, как показано на рис. 1. Измеряя расстояние между отраженными лучами на некотором расстоянии L , радиус кривизны пластины (R), используя приближение малых углов при $d_p \ll R$, можно рассчитать по формуле:

$$R = \frac{2Ld_p}{d_p - d_i} \quad (1.4)$$

где, L – расстояние от пластины до места измерения, d_p – расстояние между параллельными лазерными лучами, d_i – расстояние между отраженными от пластины лазерными лучами на расстоянии L от нее.

Параметры оптического стенда:

$$L = 5.84 \text{ m}$$

$$d_p = 30 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 0.5 \text{ mm}$$

Погрешность определения значения внутренних напряжений сводится к погрешности определения радиусов кривизны. Абсолютная погрешность (Δf) от функции $F(x_1, x_2, x_3 \dots)$ определяется по формуле:

$$\Delta f = \sqrt{(|F'_{x1}| \Delta x_1)^2 + (|F'_{x2}| \Delta x_2)^2 + \dots} \quad (1.5)$$

Для оптического стенда F и Δf имеют вид:

$$F = \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{d_1 - d_2}{2Ld_p} \quad (1.6)$$

$$\Delta f = \frac{\sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2}}{2Ld_p} \quad (1.7)$$

Погрешность определения d_p в расчетах пренебрегается из-за высокой точности производства призмы, которая создает два параллельных луча из одного. Тогда абсолютное значение погрешности определения внутренних напряжений определяется как:

$$\Delta s = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{sub}^2}{d_f} \frac{\sqrt{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2}}{2Ld_p} \quad (1.8)$$

На рисунке 1.5 приведено рассчитанное по (1.8) значение абсолютной погрешности определения значения внутренних напряжений от толщины подложки на оптическом стенде, при условии, что толщина покрытия составляет 350 нм (50 периодов по 7 нм).

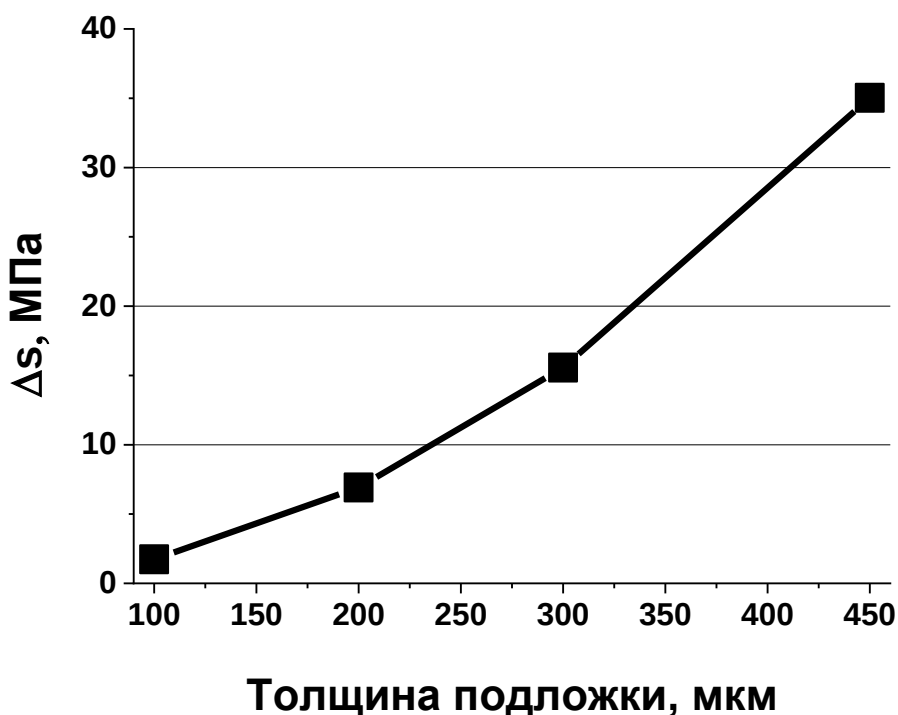


Рисунок 1.5 – Зависимость абсолютной погрешности измерения значения напряжения от толщины подложки на оптическом стенде.

С учетом используемых кремниевых подложек с толщинами 300 мкм и 450 мкм, в данной диссертационной работе погрешность определения напряжений оптическим методом составляла $\Delta s = \pm 15.6$ МПа и $\Delta s = \pm 35$ МПа, соответственно.

Значения напряжений в МРЗ Ru/Be измерялись интерферометрическим методом на интерферометре Физо ZYGO VERIFIRE 4". Измерение на интерферометре позволяет установить отклонение профиля измеряемой подложки от профиля эталона. В качестве эталона выступает пропускающая эталонная плоскость, размер - 4 дюйма, коэффициент отражения 4%, точность формы лучше $\lambda/20$. На рисунке 1.6 приведен пример измерения профиля поверхности пластины на интерферометре. Строя сечение карты поверхности получаем профиль изгиба измеряемой пластины (рис. 1.5 с).

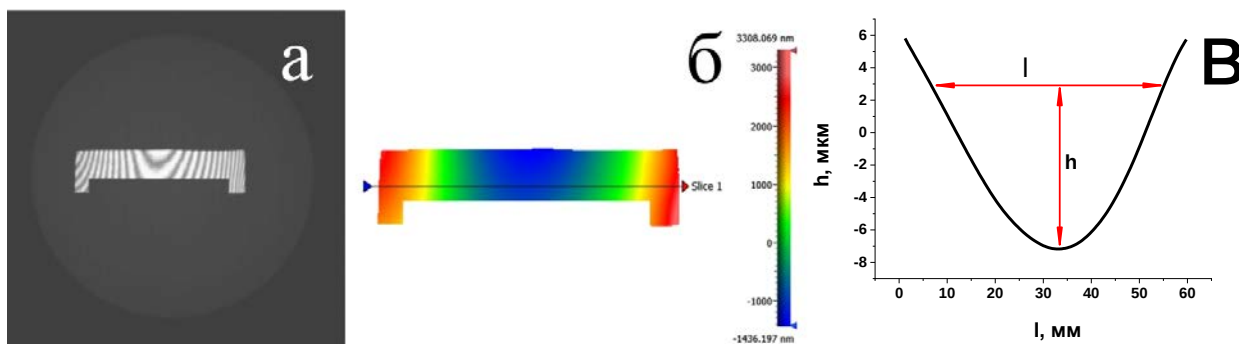


Рисунок 1.6 – Пример измерения профиля пластины: а – интерферограмма, б – карта отклонения поверхности, относительно эталона, в – пример профиля изгиба подложки по сечению 1.

Радиус кривизны измеряемой пластины (R) определяется по формуле:

$$R = \frac{h}{2} + \frac{l^2}{8h} \quad (1.9)$$

где: h – высота хорды, l – длина хорды (рис. 3 с.).

Параметры интерферометра ZYGO VERIFIRE 4" и эталона:

заявленная абсолютная погрешность определения профиля: $\Delta h = 10 \text{ нм}$;

заявленное максимальное измеряемое отклонение от плоскости: 15 мкм ;

максимальный размер образца – $\varnothing = 100 \text{ мм}$;

С учетом используемых кремниевых подложек толщиной 450 мкм и длиной 20 мм в данной диссертационной работе погрешность определения напряжений интерферометрическим методом в МРЗ Ru/Be составляла $\Delta s = \pm 2 \text{ МПа}$.

Глава 2. Исследование Mo/Be и Ru/Be многослойных зеркал для области длин волн 11 нм

2.1 Изучение рентгенооптических и физических характеристик МРЗ Mo/Be

В первых работах по изучению отражательной способности МРЗ Mo/Be было получено значение коэффициента отражения $R=70.2\%$ на длине волны 11.3 нм [30]. В дальнейшем чуть большее значение отражательной способности ($R=70.3\%$ на длине волны 11.3 нм) было получено в работе нашего института [34]. Как говорилось ранее, теоретически возможное значение отражательной способности в окрестности длины волны 11.2 нм у данного МРЗ составляет $R = 76\%$. Однако, данное значение отражения возможно только при идеальных границах раздела материалов системы и при отсутствии взаимного перемешивания слоев с образованием новых фаз. В работе [34], исследуя изображения поперечных срезов на ПЭМ, были получены значения ширин переходных границ в МРЗ Mo/Be, которые составили Mo-на-Be-0.7 нм, Be-на-Mo-0.3 нм. Однако фазовый состав переходных областей не исследовался. Это знание необходимо для адекватного решения обратной задачи рефлектометрии по восстановлению структурных параметров многослойной системы по данным рентгеновского отражения. Данное знание, в свою очередь, позволит надежно предсказывать оптические характеристики МРЗ Mo/Be в широком диапазоне длин волн и углов падения.

Так же актуальным является изучение термической стабильности МРЗ Mo/Be. В частности, в [35] сообщалось, что за счет изотермического отжига происходит перераспределение кислорода внутри слоев зеркала, из-за чего удалось увеличить коэффициент отражения более чем на 1% на длине волны 11.4 нм. Однако систематических исследований этого эффекта проведено не было.

2.1.1 Исследование термической стабильности

Высокая термическая стабильность отражающего покрытия является достаточно актуальной проблемой. В особенности это касается первого оптического элемента в литографической установке – коллектора. Его задачей является сбор и первичная монохроматизация падающего на него излучения лазерно-плазменного источника. В результате, под воздействием как рентгеновского, так и рассеянного лазерного излучения коллектор нагревается.

Для исследования термической стабильности системы Mo/Be в рамках данной работы была изготовлена серия МРЗ Mo/Be с одинаковым значением периода, оптимизированного на максимум отражательной способности на длине волны 11.4 нм, вблизи нормального падения. У всех исследуемых образцов проводились рефлектометрические измерения на длинах волн 0.154 нм и 11.4 нм в исходном состоянии и после изотермического отжига в вакууме.

На рисунке 2.1 приведены угловые зависимости коэффициентов отражения на длине волны 0.154 нм от МРЗ Mo/Be в исходном состоянии и после изотермического отжига при разных температурах и разном времени отжига.

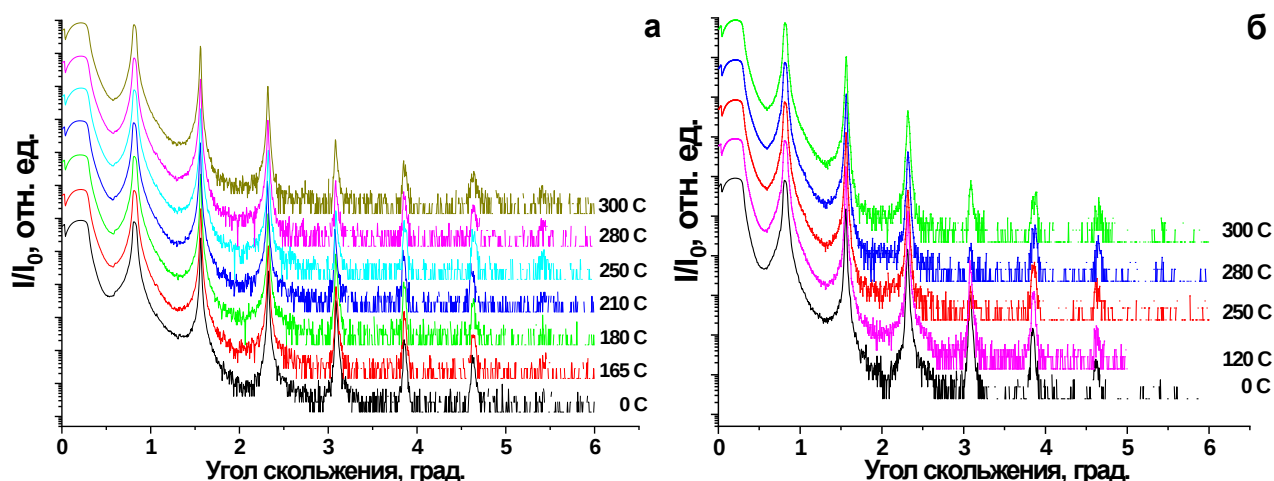


Рисунок 2.1 – Угловые зависимости коэффициентов отражения на длине волны 0.154 нм от МРЗ Mo/Be в исходном состоянии и после изотермического отжига при времени отжига 1 час (а) и 4 часа (б).

Из приведенных графиков следует, что система Mo/Be обладает высоким уровнем термической стабильности – положение брэгговских максимумов, которое определяется периодом структуры, не изменяется вплоть до температуры 300°C даже при времени отжига 4 часа. Положение критического угла, которое определяется средней плотностью системы, также остается неизменным. Также, не происходит существенного увеличения уровня шероховатости межслоевых границ – количество брэгговских максимумов остается неизменным во всем диапазоне температур и времени отжига.

После каждого изотермического отжига проводилось измерение отражательной способности. По результатам рефлектометрии на разных длинах волн проводилось моделирование внутренней структуры МРЗ. На рисунке 2.2 приведены примеры одновременного моделирования рефлектометрических измерений на разных длинах волн и разных временах отжига.

Сохранение количества брэгговских максимумов, но изменение их интенсивности, связано в большей степени не с изменением значения геометрической шероховатости, а с изменением ширины переходного слоя и химического взаимодействия материалов структуры между собой.

Стандартно, для описания геометрической шероховатости в МРЗ используется функция ошибок (erf). Теоретическая подгонка кривых отражения от МРЗ в исходном состоянии осуществляется только с помощью этой функции. Однако, после термического отжига, сохранить тоже количество брэгговских максимумов, но при этом, занизить или завысить определенные брэгговские максимумы с использованием только функции ошибок не представляется возможным. В данном случае подгонка кривых отражения от отожженных образцов осуществлялась дополнительно с использованием линейной функции [79, 5]. Меняя веса функции ошибок и линейной функции удалось добиться удовлетворительной подгонки. На рисунке 2.2 приведен пример одновременного моделирования экспериментальных зависимостей коэффициентов отражения на разных длинах волн.

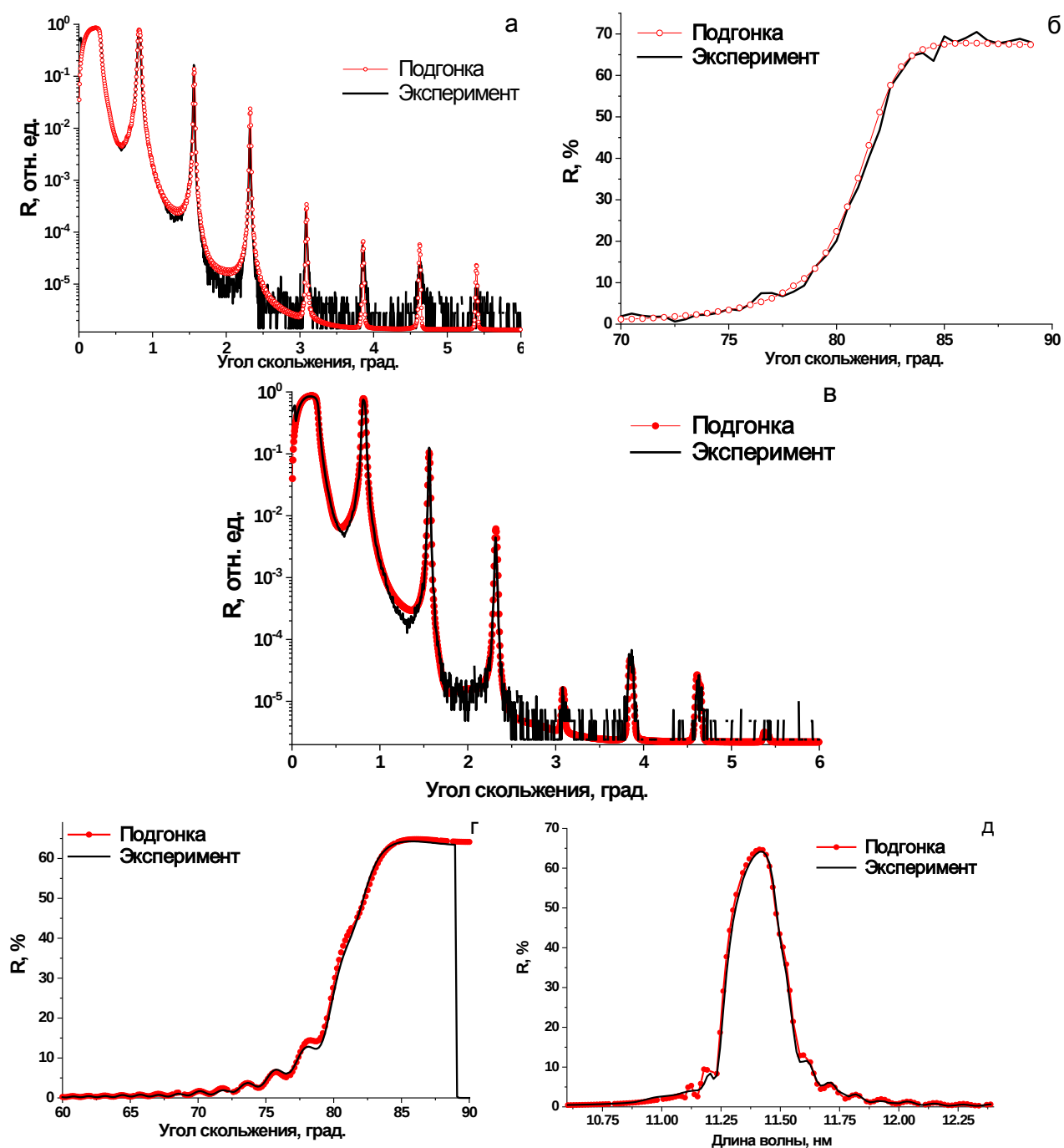


Рисунок 2.2 – Пример одновременной подгонки экспериментальных угловых зависимостей коэффициентов отражения на длине волны 0.154 нм (а и в), на рабочей длине волны 11.4 нм на лабораторном (б) и на синхротронном (г) рефлектometрах и спектральной зависимости коэффициента отражения при угле скольжения 88° на синхротронном рефлектometре (д) от МРЗ Мо/Ве, отожженного при 300°C и времени отжига 1 час (а и б) и 4 часа (в, г и д).

В результате подгонки рефлектометрических измерений, значения переходного слоя (s) и отношение веса линейной функции к функции ошибок после термического отжига при 300°C составили - $s(\text{Be-на-Mo}) \sim 0.4$ нм, $s(\text{Mo-на-Be}) \sim 0.75$ нм после отжига в течении одного часа и $s(\text{Be-на-Mo}) \sim 0.49$ нм, $s(\text{Mo-на-Be}) \sim 0.86$ нм после 4-х часов. Толщина верхнего оксидного слоя, исходно составляющая $t(\text{BeO}) \sim 2.5$ нм, после отжига при 300°C в течении 1 часа возросла до $t(\text{BeO}) \sim 2.8$ нм, а после 4-х часов до $t(\text{BeO}) \sim 3.2$ нм.

В результате измерений коэффициентов отражения на рабочей длине волны ($\lambda = 11.4$ нм) было установлено, что положение пика отражения в результате изотермического отжига при 300°C смещается в сторону больших углов на $\sim 1.8^{\circ}$. Этот сдвиг соответствует уменьшению оптического периода зеркала на 0.2%. Относительные изменения коэффициентов отражения на длине волны 11.4 нм зеркал, отожженных в течение 1-го и 4-х часов в зависимости от температуры приведены на рисунке 2.3.

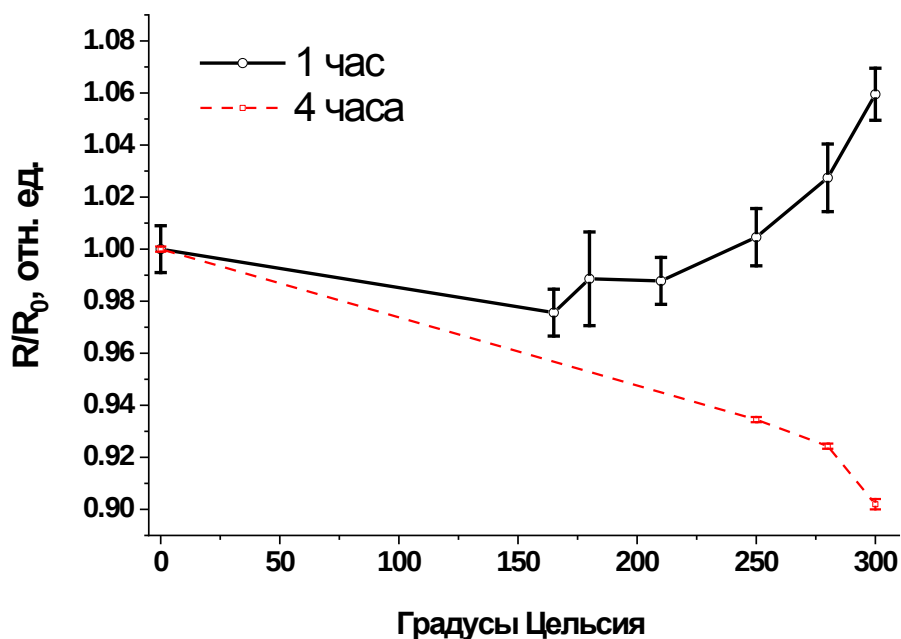


Рисунок 2.3 – Зависимости максимума коэффициента отражения МРЗ Мо/Ве на длине волны 11.34 нм от температуры отжига, отожженных при времени отжига 1 час и 4 часа. Коэффициент отражения нормирован на коэффициент отражения исходного образца.

Такое поведение коэффициента отражения от температуры и времени отжига не плохо соответствует данным работы [35]. Однако, в нашем случае, удалось повысить значение коэффициента отражения на ~6%, относительно исходного значения, при температуре отжига 300° и времени отжига 1 час.

2.1.2 Исследование микроструктуры слоев и интерфейсов

Для определения состава переходных слоев и его изменения в результате термического отжига в рамках данной работы была изготовлена серия многослойных периодических систем Mo/Be с разной толщиной слоя Mo в периоде: 0.2 нм, 0.6 нм, 1.0 нм и 2.3 нм, но с одинаковой толщиной слоя Be ~ 3.4 нм. Количество периодов в системе определялись таким образом, чтобы общая толщина Mo во всех слоях в сумме составляла ~100 нм. Также была изготовлена пленка Mo, толщиной ~100 нм.

На рисунке 2.4 показаны угловые зависимости коэффициента отражения от исследуемых многослойных систем Mo/Be в исходном состоянии и после изотермического отжига в вакууме при температуре 300°С с разным временем отжига.

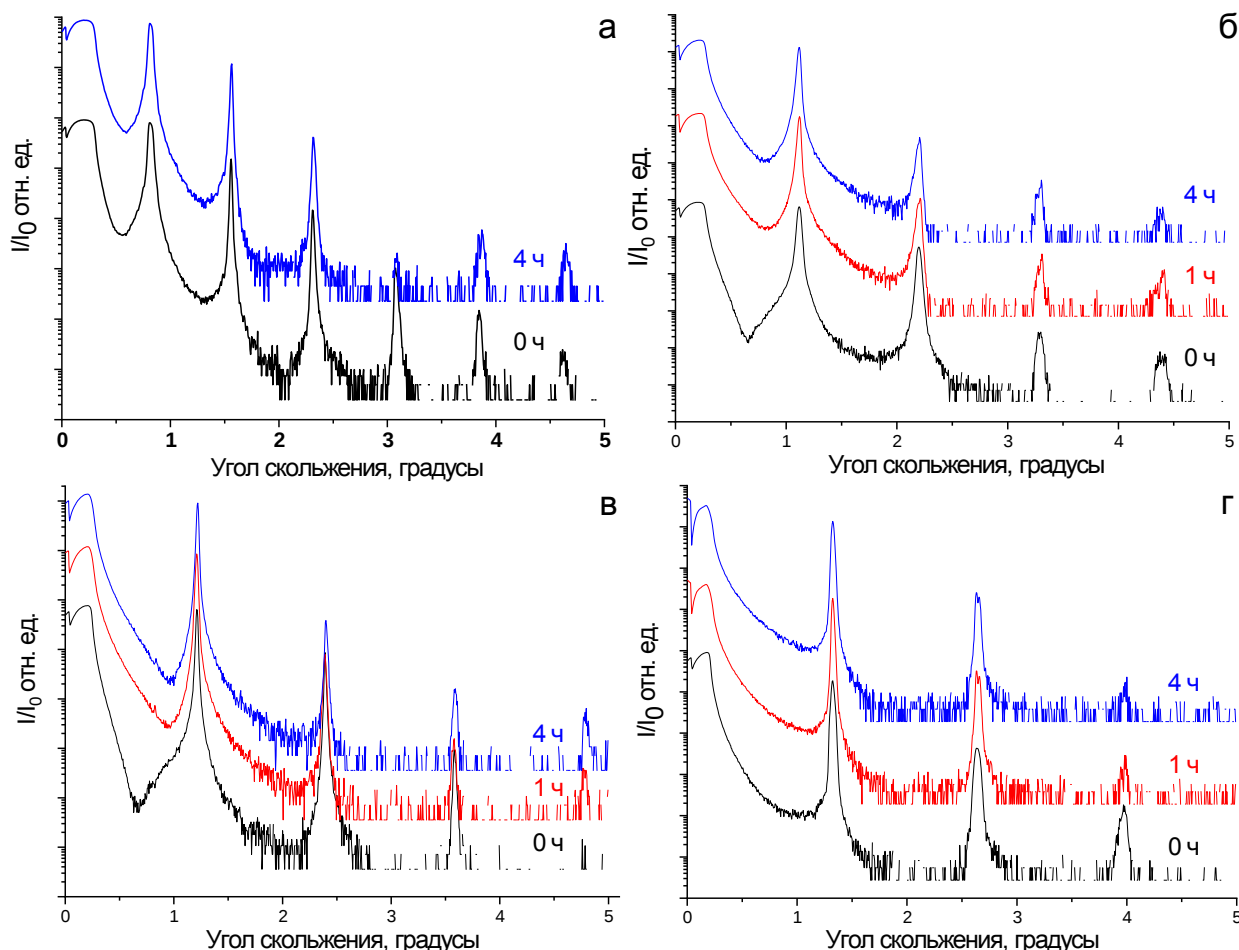


Рисунок 2.4 – Угловые зависимости коэффициентов отражения на длине волны 0.154 нм от многослойных периодических систем Mo/Be с разными толщинами Mo в структуре (а – $t(\text{Mo})=2.3$ нм, б – $t(\text{Mo})=1$ нм, в – $t(\text{Mo})=0.6$ нм и г – $t(\text{Mo})=0.2$ нм) в исходном состоянии и после отжига.

Как видно из рисунка 2.4, система Mo/Be обладает хорошей периодичностью и хорошей термической стабильностью – значение периода в результате отжига остается неизменным даже при малой толщине слоя Mo в периоде.

На рисунке 2.5 представлены XANES и EXAFS спектры от исследуемых многослойных систем Mo/Be и эталонного Mo. А на рисунке 2.6 представлены EXAFS спектры и функции радиального распределения атомов, полученных из XANES и EXAFS спектров.

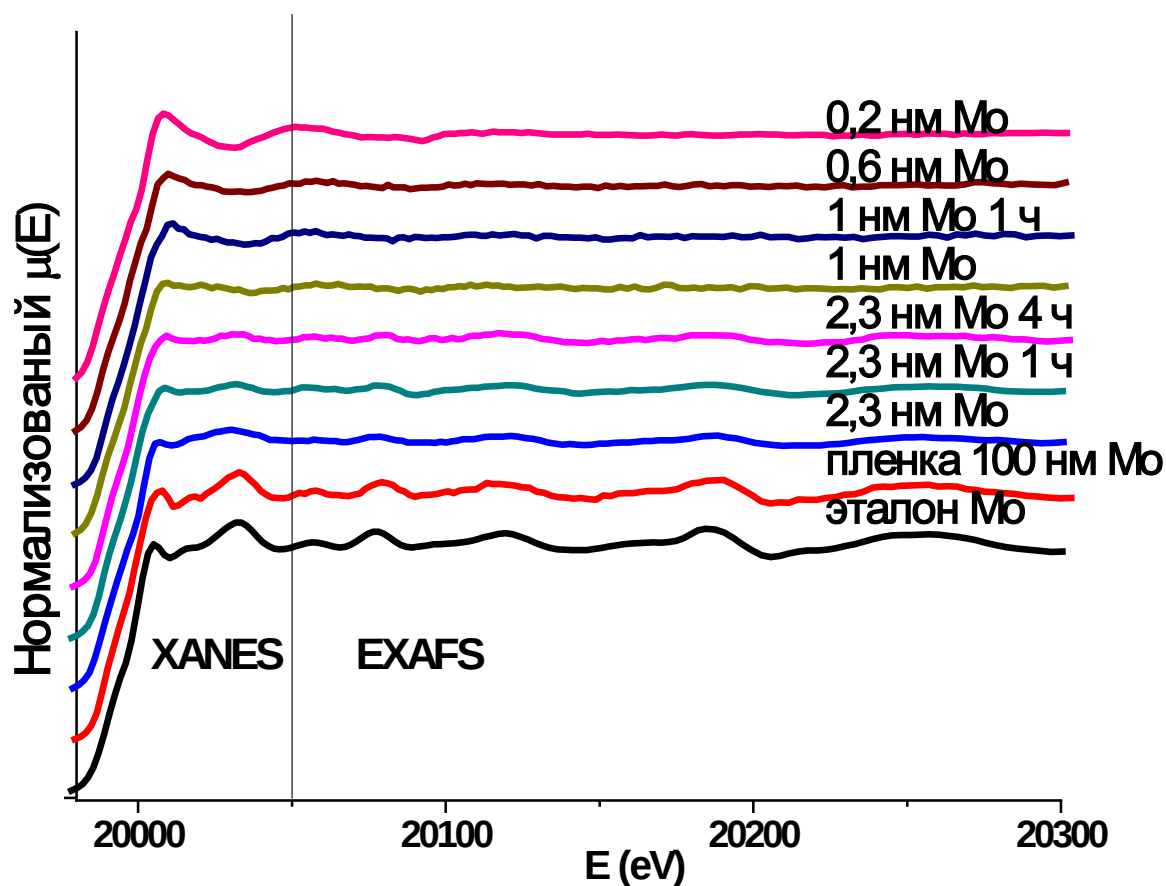


Рисунок 2.5 – XANES и EXAFS спектры многослойных систем Мо/Ве с разной толщиной слоя Мо в периоде (0.2 нм, 0.6 нм, 1 нм и 2.3 нм Мо) в исходном состоянии и после отжига, тонкой пленки Мо, толщиной 100 нм и эталона Мо.

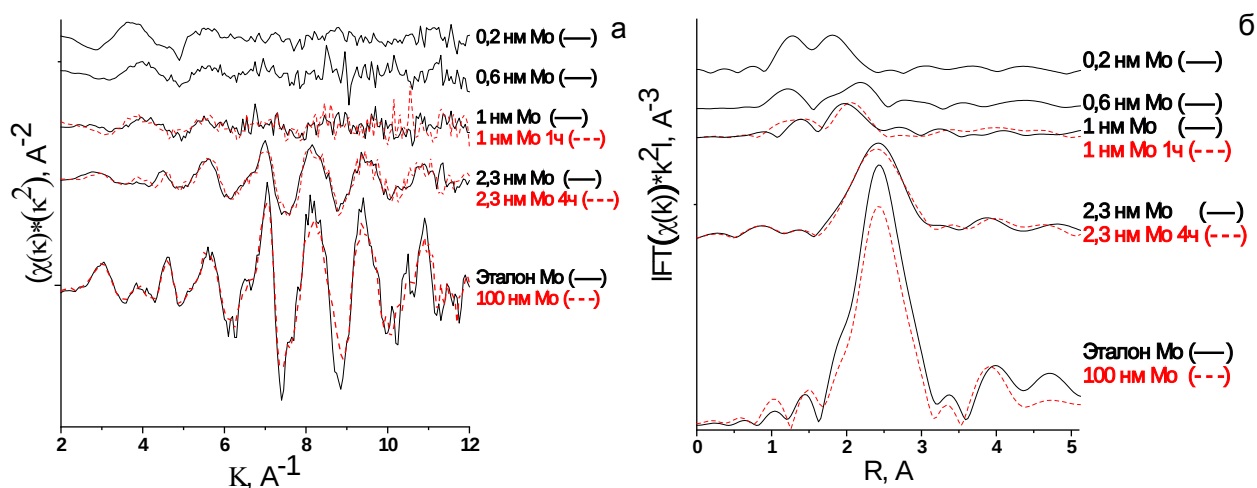


Рисунок 2.6 – Спектры EXAFS (а) и функция радиального распределения атомов (б) многослойных систем Мо/Ве с разной толщиной слоя Мо в периоде (0.2 нм, 0.6 нм, 1 нм и 2.3 нм Мо) в исходном состоянии и после отжига, тонкой пленки Мо, толщиной 100 нм и эталона Мо.

В результате расшифровки спектров было установлено:

1) Чистая пленка Мо обладает незначительным количеством дефектов и по своей микроструктуре приближается к эталонному молибденовому образцу.

2) Многослойная система Мо/Ве с толщиной Мо ~ 2.3 нм имеет сдвиг края поглощения на 0.7 эВ, что свидетельствует о наличии дополнительной фазы в структуре Мо/Ве. Положение осцилляций в EXAFS спектрах и функциях радиального распределения атомов близко к таковым в эталонном Мо. После термического отжига осцилляции дальше смещаются в сторону эталонного Мо. По спектрам от системы Мо/Ве с толщиной Мо ~ 2.3 нм нельзя однозначно установить состав дополнительной фазы.

3) Спектры от многослойных систем Мо/Ве с толщинами слоев Мо в периоде ~1 нм, ~0.6 нм и ~0.2 нм полностью не соответствуют спектрам эталонного Мо и толстой пленки Мо. В EXAFS спектрах от исследуемых систем полностью отсутствуют какие-либо осцилляции. Таким образом, дальнейшее исследование данных систем сводится только к анализу XANES спектров.

В XANES спектрах обнаружен сдвиг края поглощения и смещение положения осцилляций. Сдвиг края поглощения тем сильнее, чем меньше толщина слоя Мо в системе: 1 эВ для системы Мо/Ве с толщиной Мо ~1 нм, 1.1 эВ – для Мо ~0.6 нм и 2.1 эВ – для Мо ~0.2 нм. Сдвиг края поглощения в XANES спектрах от систем Мо/Ве однозначно указывает на образование в них новой фазы – соединения Мо с Ве. Методом конечных разностей в программе FDMNES были рассчитаны теоретические XANES спектры нескольких бериллидов молибдена. На рисунке 2.7 представлены экспериментальные XANES спектры от систем Мо/Ве с толщинами слоев Мо 0.2 нм, 0.6 нм и 1.0 нм в исходном состоянии и теоретически рассчитанные XANES спектры от различных бериллидов молибдена (MoBe_2 , MoBe_{12} и MoBe_{22}).

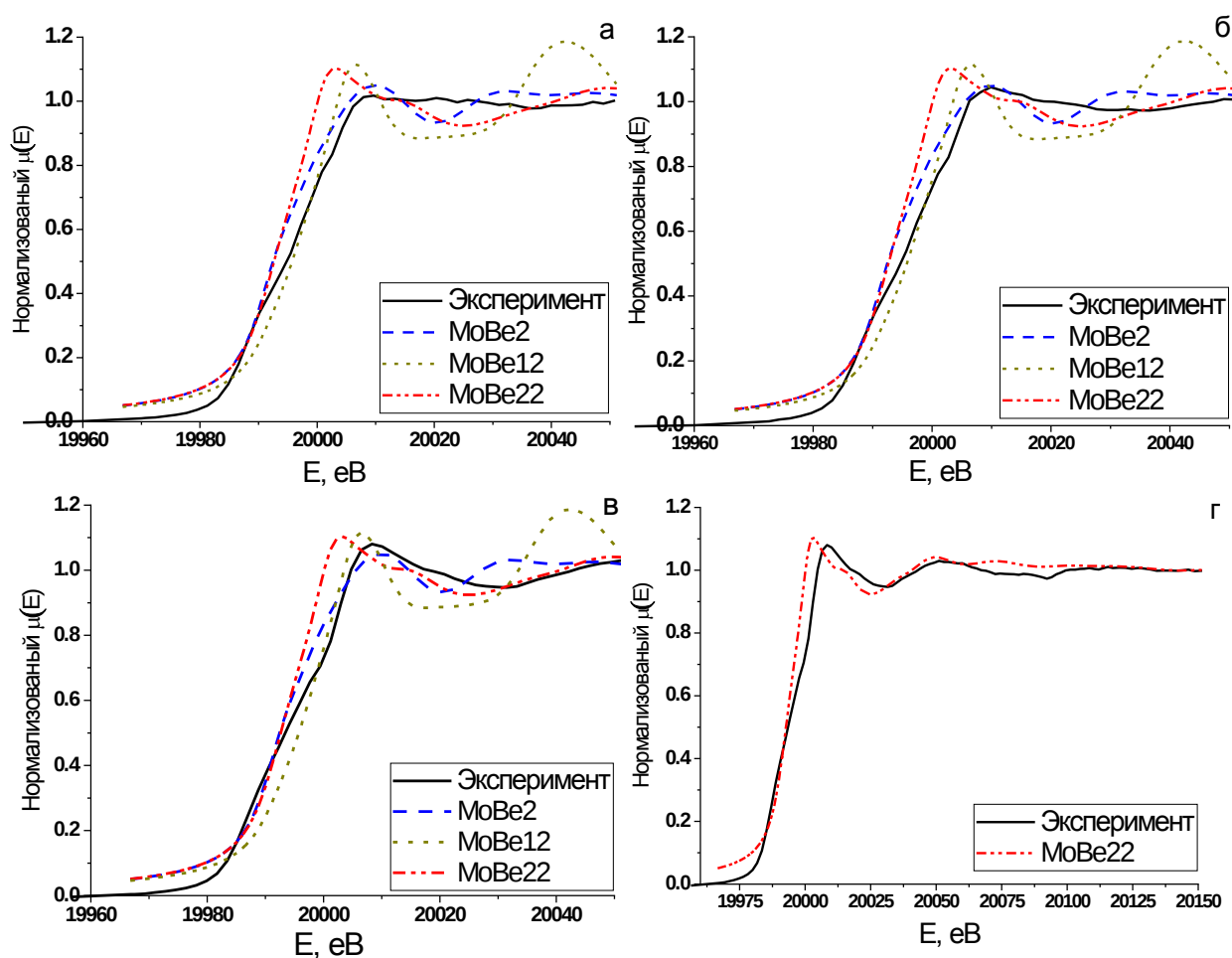


Рисунок 2.7 - Сравнение экспериментальных (—) XANES спектров от многослойных систем Мо/Ве с разными толщинами Мо в периоде (а – 1 нм Мо, б – 0.6 нм Мо, в и г – 0.2 нм Мо) с теоретическими XANES спектрами бериллидов молибдена: MoBe_2 , MoBe_{12} и MoBe_{22} .

По результатам сравнения видно, что XANES спектры систем Мо/Ве с толщинами слоя Мо в периоде ~ 0.6 нм (рис 2.7 б) и ~ 1 нм (рис. 2.7 а) находятся между теоретически рассчитанными спектрами бериллидов молибдена, при этом не соответствуя спектрам ни одного из них, как в исходном состоянии, так и после отжига. А XANES спектр от системы Мо/Ве с толщиной слоя Мо в периоде ~ 0.2 нм по форме (числу деталей и соотношению их интенсивностей) имеет схожесть с теоретическим XANES спектром бериллида MoBe_{22} (рис. 2.7 в,г). Однако, как и в случае с другими толщинами слоя Мо в периоде системы Мо/Ве, положение края поглощения не соответствует ни одному из теоретических положений краев поглощения, рассмотренных бериллидов.

Данная информация дает основание предполагать, что в системе Mo/Be с толщиной слоя Mo в периоде ~ 0.2 нм, образуется химическое соединение Mo с Be, схожее по составу с MoBe_{22} . Предположительно, при увеличении толщины, дополнительно образуется другое химическое соединение Mo с Be, которое в совокупности с образованным соединением, схожим с MoBe_{22} , дает средний XANES спектр, не поддающийся анализу.

В результате подгонки экспериментальных EXAFS спектров и функций радиального распределения атомов (рис. 2.8) были установлены радиусы координационных сфер и координационные числа (табл. 2.1). В таблице 2.2 представлены восстановленные, по экспериментальным спектрам, значения радиусов координационных сфер и координационных чисел Mo и бериллидов молибдена.

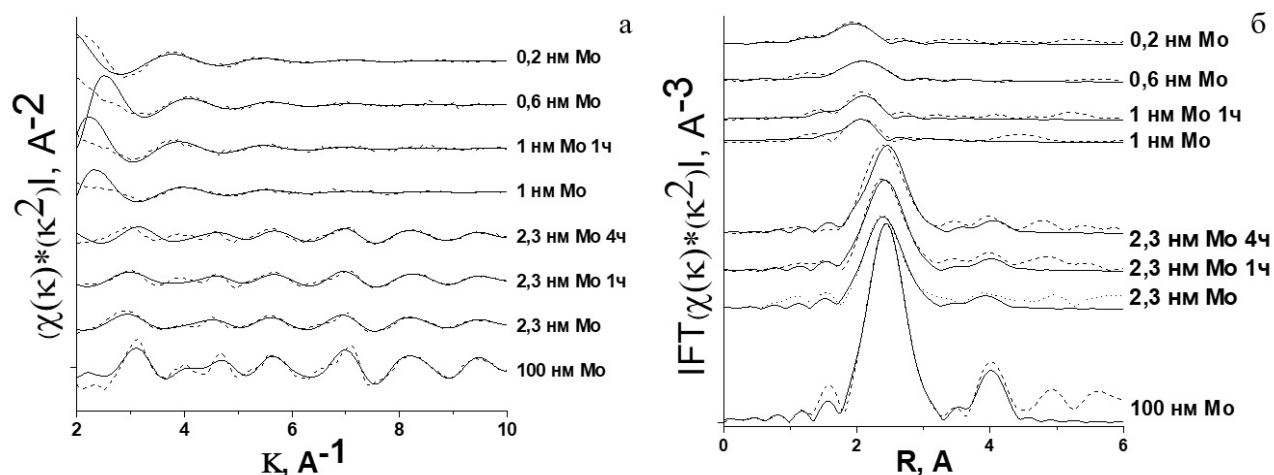


Рисунок 2.8 – Экспериментальные (---) и подгоночные (—) EXAFS спектры (а) и функции радиального распределения (б) от систем Mo/Be, в исходном состоянии и после отжига и тонкой пленки Mo, толщиной 100 нм.

Таблица 2.1 – Значения межатомных расстояний и координационных чисел, полученных из EXAFS эксперимента.

Толщина Мо в структуре и время отжига	Связь	R, Å	Координационное число	σ^2 , Å ²
0.2 нм	Mo-Be	2.54	4.0	0.004
0.6 нм	Mo-Be	2.60	3.5	0.003
1 нм	Mo-Be	2.60	2.7	0.003
1 нм 1 час	Mo-Be	2.61	3.8	0.003
2.3 нм	Mo-Mo	2.69	3.4	0.005
	Mo-Mo	3.11	2.4	0.004
	Mo-Mo	4.36	2.4	0.006
2.3 нм 1 час	Mo-Mo	2.69	3.2	0.005
	Mo-Mo	3.10	1.6	0.005
	Mo-Mo	4.40	2.8	0.004
2.3 нм 4 часа	Mo-Mo	2.72	3.4	0.005
	Mo-Mo	3.13	2.3	0.005
	Mo-Mo	4.42	3.3	0.008
Пленка 100 нм	Mo-Mo	2.71	5.9	0.004
	Mo-Mo	3.11	5.1	0.008
	Mo-Mo	4.40	12.0	0.004

Таблица 2.2 – Значения межатомных расстояний и координационных чисел для кристалла молибдена и бериллидов молибдена.

Фаза	Связь	R, Å	Координационное число
Mo	Mo-Mo	2.73	8
	Mo-Mo	3.15	6
	Mo-Mo	4.45	12
MoBe ₂	Mo-Be	2.55	3
	Mo-Be	2.59	3
	Mo-Be	2.64	6
	Mo-Mo	2.67	3
MoBe ₁₂	Mo-Be	2.54	4
	Mo-Be	2.61	8
	Mo-Be	2.77	8
	Mo-Mo	4.08	8
	Mo-Mo	4.23	2
MoBe ₂₂	Mo-Be	2.49	12
	Mo-Be	2.52	4
	Mo-Be	4.21	6
	Mo-Be	4.29	24

Радиусы первой координационной сферы от многослойных систем Mo/Be с толщинами Mo в периоде ~ 0.2 нм ~ 0.6 нм и ~ 1 нм имеют близкие значения к таковым в трех бериллидах: MoBe_2 , MoBe_{12} и MoBe_{22} . Однако, как указывалось ранее, только система Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~ 0.2 нм имеет схожесть в своем виде с бериллидом молибдена– MoBe_{22} , что позволяет предположить его образование. Однозначно установить состав перемешанных зон у двух других толщин этим методом невозможно.

При толщине слоя Mo в периоде ~ 2.3 нм в системе Mo/Be, значения радиусов координационных сфер близки к таковым у пленки Mo. Координационное число в исходном состоянии ниже, чем в чистой пленке Mo, что говорит о наличии большего числа дефектов в тонком слое, чем в толстой пленке. После отжига радиусы координационных сфер приближаются к эталонным значениям, а также увеличиваются координационные числа, что говорит об уменьшении количества дефектов и увеличении дальнего порядка. Однако координационные числа у отоженных многослойных систем Mo/Be меньше, чем в чистой пленке Mo. Наличие координационных сфер, соответствующих связям Mo-Be в системе Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~ 2.3 нм установить не удалось, несмотря на то, что данные связи присутствуют в образцах с меньшей толщиной слоя Mo в периоде системы Mo/Be.

Для дальнейшего анализа многослойных систем Mo/Be были проведены измерения рентгеновского фазового анализа. На рисунках 2.9 – 2.12 приведены картины рентгеновского фазового анализа и его расшифровка для исследуемых систем Mo/Be.

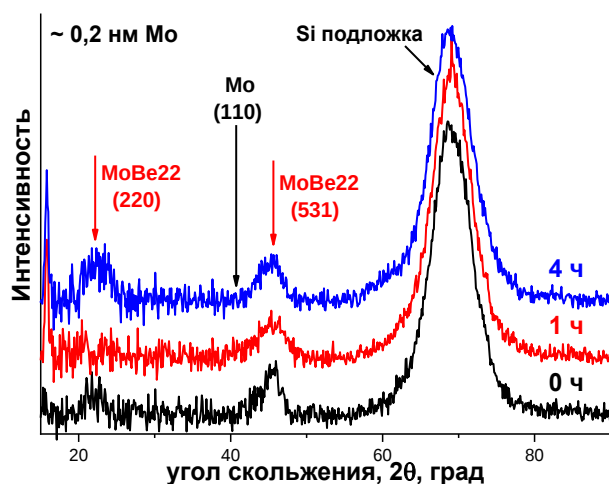


Рисунок 2.9 - Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0.154\text{nm}$) многослойной периодической системы Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~ 0.2 нм.

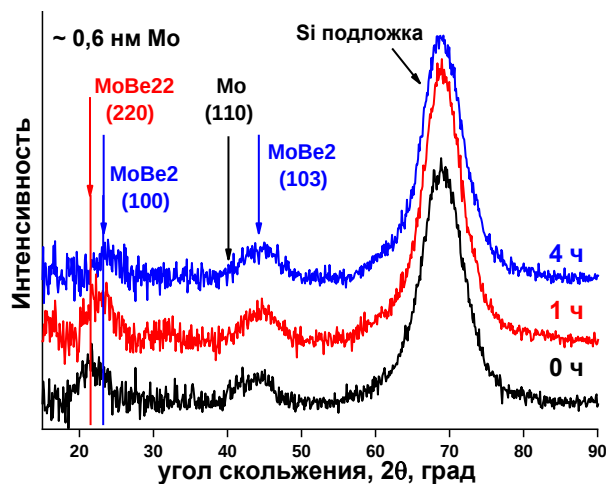


Рисунок 2.10 – Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0.154\text{nm}$) многослойной периодической системы Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~ 0.6 нм.

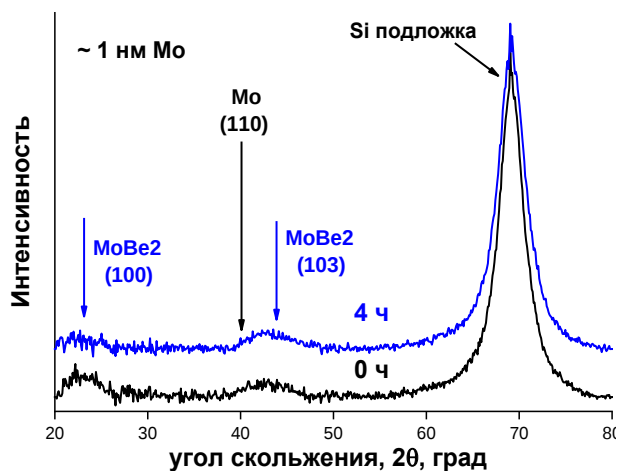


Рисунок 2.11 - Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0.154\text{nm}$) многослойной периодической системы Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~ 1 нм.

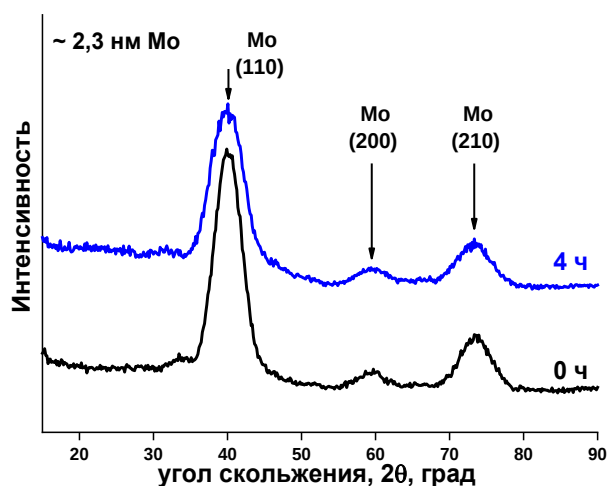


Рисунок 2.12 - Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0.154\text{нм}$) многослойной периодической системы Mo/Be с толщиной Mo в периоде $\sim 2.3\text{ нм}$.

В многослойной системе Mo/Be с толщиной слоя Mo в периоде $\sim 0.2\text{ нм}$ на картине фазового анализа наблюдаются рефлексы только от MoBe_{22} (рис. 2.9). Термический отжиг в течении 1 часа не приводит к изменениям спектра, а после термического отжига в течении 4-х часов происходит усиление пиков, соответствующих MoBe_{22} . Это свидетельствует об увеличении размера бериллидной фазы. Рефлекса от Mo в спектре не наблюдается.

В многослойной системе Mo/Be с толщиной слоя Mo в периоде $\sim 0.6\text{ нм}$ на картине фазового анализа наблюдаются рефлексы, как от MoBe_{22} , так и от MoBe_2 (рис. 2.10). Отжиг в течении одного часа не приводит к изменению спектра фазового анализа. После отжига в течении 4-х часов рефлексы от MoBe_{22} пропадают и наблюдаются только рефлексы бериллида MoBe_2 . Это означает, что в результате активного диффузионного процесса в системе Mo/Be более выгодно образование бериллида MoBe_2 , а не MoBe_{22} .

В многослойной системе Mo/Be с толщиной слоя Mo в периоде $\sim 1.0\text{ нм}$ на картине фазового анализа наблюдаются рефлексы только от MoBe_2 (рис. 2.11). Рефлексы от бериллида MoBe_{22} не были обнаружены ни в исходном состоянии, ни после термического отжига. Полное отсутствие рефлексов от MoBe_{22} при толщине слоя Mo в периоде $\sim 1.0\text{ нм}$, но их наличие при более тонких значениях толщин остается неясным.

В многослойной системе Mo/Be с толщиной слоя Mo в периоде ~ 2.3 нм на картине фазового анализа наблюдаются рефлексы только от Mo (рис. 2.12). Рефлексы от бериллидов молибдена, видимых при меньших значениях толщины обнаружены не были.

Для дальнейшего анализа структур были проведены исследования методом РФЭС. Для исследования данным методом были изготовлены однопериодные и многопериодные системы Mo/Be с верхним слоем Be и инверсные – с верхним слоем Mo. Этот метод позволяет отдельно установить состав перемешанных зон на разных границах раздела, что не позволяли прошлые методы. На рисунке 2.13 представлен пример экспериментального и расшифрованного фотоэлектронного спектра на линии Be1S от систем Mo/Be с разным количеством периодов.

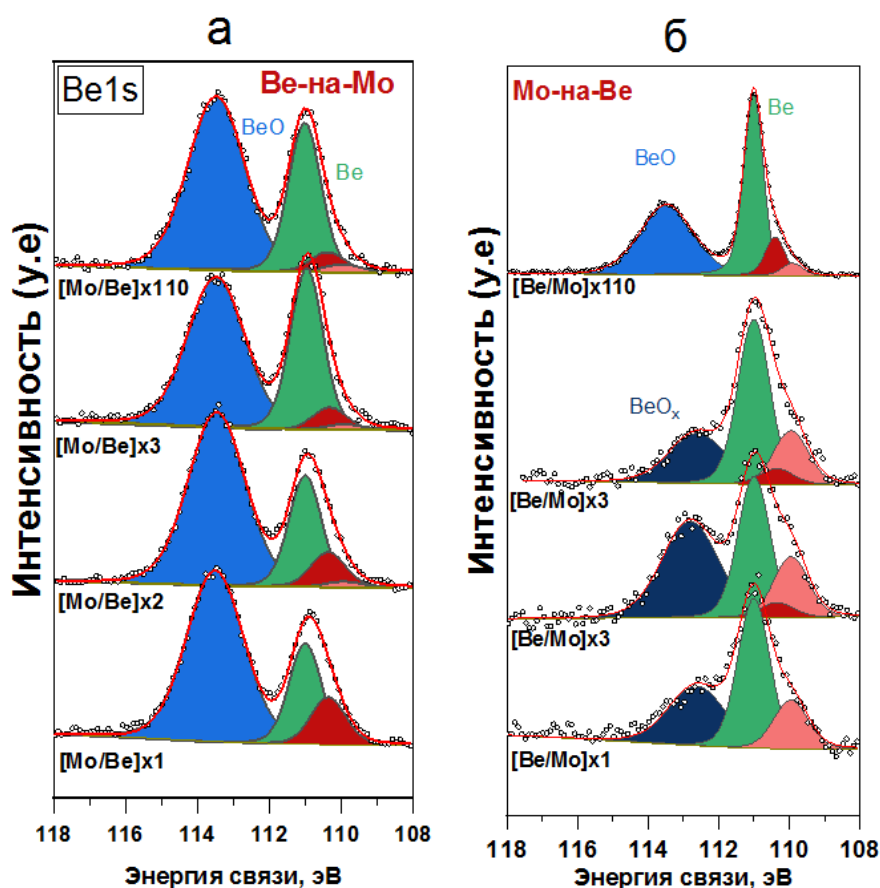


Рисунок 2.13 - Экспериментальные и разложенные фотоэлектронные спектры на линии Be 1s системы $[\text{Mo/Be}]_{110}$ и модельных систем $[\text{Mo/Be}]_n$ (а) и $[\text{Be/Mo}]_n$ (б).

В результате расшифровки фотоэлектронных спектров был установлен состав перемешанных зон на границах раздела: Ве-на-Мо – MoBe_x , $x=8.9\pm2.0$ и Мо-на-Ве – MoBe_x , $x=2\pm0.2$. Важно отметить, что стехиометрического состава MoBe_x , где $x=8.9\pm2.0$ не существует, а ближайший к этому состав – MoBe_{12} . По данным, описанным выше, в результате химического взаимодействия образуются соединения, схожие с составами MoBe_2 и MoBe_{22} . В случае с составом перемешанной зоны MoBe_2 не возникает никаких противоречий - все экспериментальные результаты подтверждают образование именно этого состава. Вопрос с определением состава химического соединения на другой границе остается нерешенным. На данный момент можно однозначно установить, что на границе Мо-на-Ве образуется химическое соединение с меньшим содержанием бериллия, а именно MoBe_2 , а на границе Ве-на-Мо с большим содержанием бериллия: либо MoBe_{12} , либо MoBe_{22} .

Таким образом, проведенное комплексное исследование динамики микроструктуры слоев и интерфейсов от толщины слоев Мо и времени вакуумного отжига обнаружило следующие закономерности. В результате изотермического отжига при 300°C в течении одного часа не происходит изменения внутренней микроструктуры – состав переходных границ остается неизменным. Также, нет существенного изменения ширин переходных границ и верхнего окисленного слоя (п.2.1.1). Таким образом, отжиг в течении одного часа не приводит к негативным эффектам и рост коэффициента отражения происходит от положительного эффекта перераспределения кислорода внутри многослойной структуры [35].

Увеличения времени отжига до 4-х часов приводит к падению коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм. Это связано с изменением внутренней микроструктуры – соединение с большим количеством бериллия (MoBe_{12} или MoBe_{22}) переходит в MoBe_2 , происходит рост ширин переходных границ и увеличение толщины верхнего окисленного слоя (п.2.1.1). Такое негативное изменение дает большой вклад в понижение коэффициента

отражения, чем увеличение R от перераспределения кислорода внутри многослойной структуры.

2.2 Изучение свойств МРЗ Ru/Be

Теоретически, в окрестности длины волны 11.2 нм, большими и пиковым и интегральным коэффициентами отражения обладают МРЗ Ru/Be. Так в случае идеальной 12-ти зеркальной схемы для литографии, эффективность Ru/Be оптики на длине волны 11.2 нм превосходит Mo/Si оптику на длине волны 13.5 нм примерно в 2 раза. Однако экспериментальные результаты МРЗ Ru/Be оказались гораздо скромнее: коэффициент отражения составил 63.7% при спектральной ширине отражения на полувысоте 0.34 нм [30]. Такое сильное несоответствие экспериментальной и теоретической отражательных характеристик авторы работы связывают с высоким уровнем шероховатости межслоевых границ в МРЗ, однако, численные значения интерфейсов в работе не приводятся. Также, влияние на рентгенооптические характеристики оказывает сильное перемешивание слоев. Как показали результаты работы [30], МРЗ Ru/Be представляет собой переменно чередующиеся слои чистого Ru и сплава Ru с Be, вместо слоя чистого Be. Состав сплава не указывается.

Также, было исследовано МРЗ $\text{Mo}_x\text{Ru}_{x-1}/\text{Be}$ [32]. В данном МРЗ, вместо слоя чистого рутения, осаждался сплав рутения с молибденом. Максимальное значение коэффициента отражения этого МРЗ составляет 69.3%, а спектральная ширина 0.35 нм. Стехиометрический состав используемого сплава Ru-Mo не указывается.

Таким образом, свойства данного МРЗ были изучены недостаточно и полученные отражательные характеристики сильно уступают теоретическому пределу ($R=78\%$, $\Delta\lambda=0.43$ нм), что дает надежду на получение более высоких отражательных характеристик.

2.2.1 Изучение МРЗ Ru/Be

В рамках данной работы была изготовлена серия МРЗ Ru/Be с периодами $d \sim 5.8$ нм, с разным соотношением толщин слоев Ru и Be в периоде. Количество периодов во всех структурах было одинаково и составляло $N=80$. На рисунке 2.14 представлены зависимости экспериментально измеренных коэффициентов отражения и спектральной ширины от МРЗ Ru/Be в зависимости от соотношения толщины слоя Ru к периоду ($\gamma = t(\text{Ru})/d$).

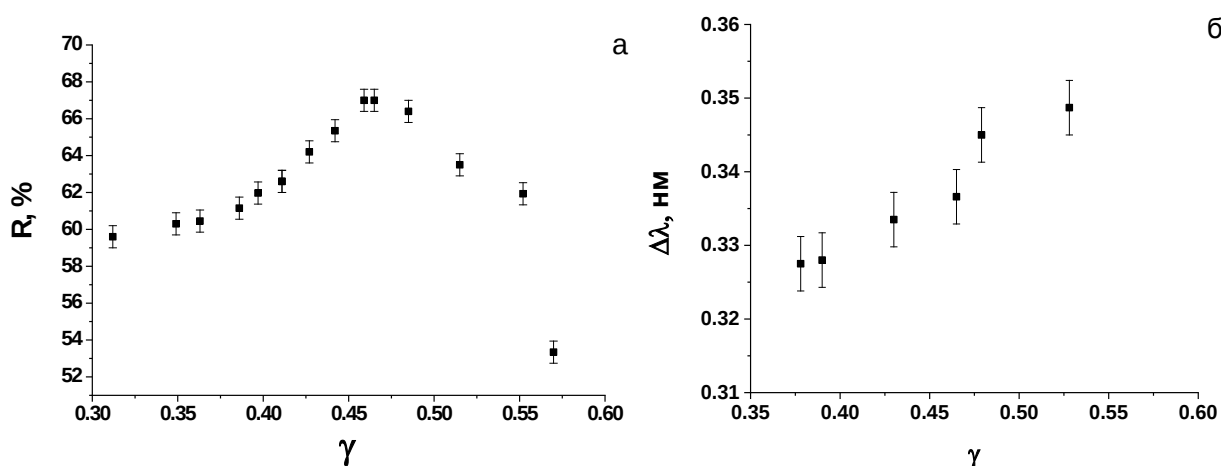


Рисунок 2.14 – Зависимости экспериментально измеренных коэффициента отражения (а) и спектральной ширины (б) от МРЗ Be/Ru.

Максимум отражательной способности МРЗ Be/Ru составляет $R \sim 67\%$ и приходится на долю рутения в периоде $\gamma \approx 0.47$. При этом спектральная ширина составляет $\Delta\lambda \sim 0.34$ нм. Следует отметить, что данное значение коэффициента отражения выше на $\sim 3.5\%$, чем получаемое ранее в работе [30]. При этом спектральная ширина находится на том же уровне. Такое увеличение отражательной способности мы связываем с улучшением технологического процесса изготовления многослойных периодических систем за последние 20 лет. Тем не менее, данное значение отражательной способности все еще ниже, чем у МРЗ Mo/Be [34] или у МРЗ $\text{Mo}_x\text{Ru}_{1-x}/\text{Be}$ [32].

В результате теоретического моделирования рентгеновского отражения на разных длинах волн были получены кривые электронной плотности и

распределения материала по глубине (рис. 2.15) и значения ширины переходных границ.

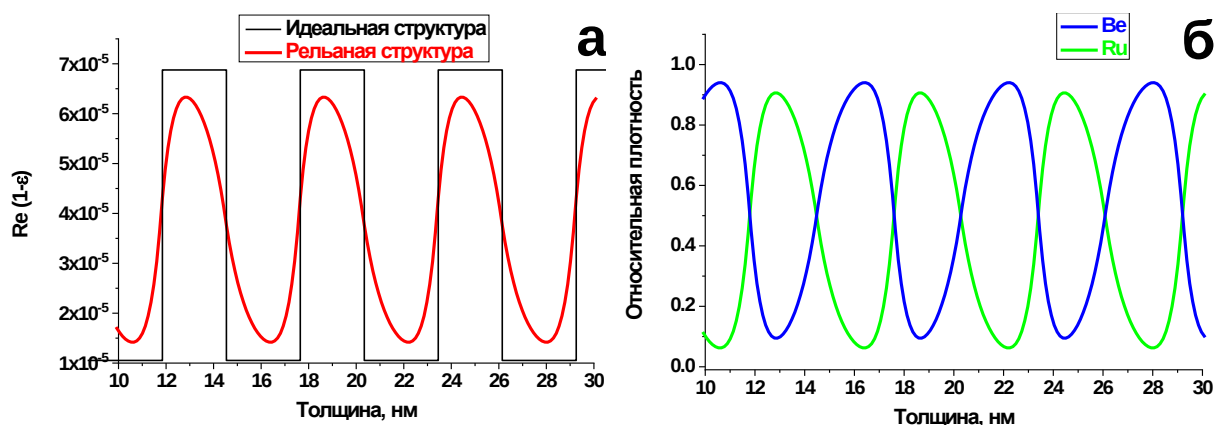


Рисунок 2.15 - Восстановленные по данным рентгеновской рефлектометрии профиль электронной плотности (а) и распределение материалов по глубине (б) в МРЗ Ru/Be. Зависимость типа «Меандр» соответствует табличным значениям диэлектрической проницаемости и плотности материалов, и нулевым межслоевым шероховатостям, плавные кривые – восстановленные профили по данным рентгеновского отражения.

В МРЗ Ru/Be, согласно подгонке кривых отражения, не наблюдается «чистых» слоев Be и Ru. Также, МРЗ Ru/Be обладает большим значением ширины переходных слоев: Ru-на-Be – ≈ 1.1 нм, Be-на-Ru – ≈ 0.45 нм, что качественно находится в согласии с результатами работы [30], где отмечается высокий уровень шероховатости межслоевых границ и сильное перемешивание материалов многослойной системы между собой.

2.2.2 Изучение МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на границах раздела

После определения оптимального соотношения слоев в периоде, а именно $\gamma \approx 0.47$, была изготовлена серия МРЗ Ru/Be с буферным слоем Mo на разных границах раздела. Толщины буферных слоев Mo составляли 0.2 нм, 0.4 нм и 0.6 нм. Увеличение толщины буферного слоя Mo проводилось за счет уменьшения толщины слоя Ru, а толщина слоя Be оставалась неизменной. На

рисунке 2.16 представлены зависимости коэффициента отражения – а) и спектральной ширины –б) измеренные на длине волны 11.4 нм от МРЗ Be/Ru с буферными слоями Мо на разных границах раздела от толщины буферного слоя Мо в периоде. Значение толщины Мо=0 соответствует МРЗ Ru/Be без буферных слоев Мо.

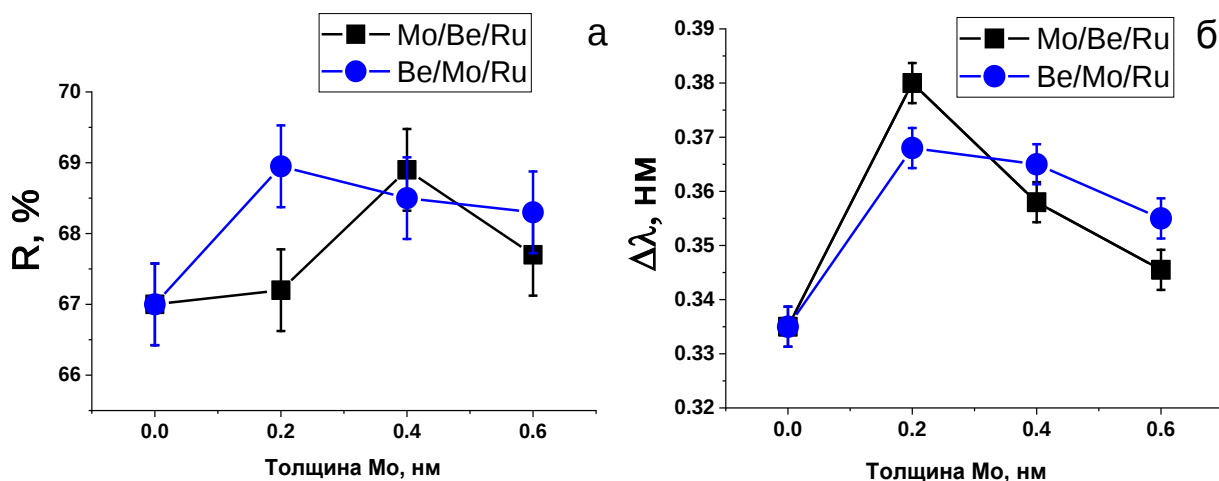


Рисунок 2.16 - Зависимости коэффициента отражения (а) и спектральной ширины (б) на длине волны 11.4 нм от толщины слоя Мо в периоде в МРЗ Be/Ru с буферными слоями Мо на разных границах раздела.

Добавление буферного слоя Мо в МРЗ Ru/Be как на одну, так и на другую границу раздела приводит к росту отражательной способности и спектральной ширины. При этом, максимальное значение отражения $R \sim 69\%$ достигается при толщине слоя Мо: 0.2 нм на границе Ru-на-Be и 0.4 нм на границе Be-на-Ru. При этом, значения спектральной ширины составляют $\Delta\lambda = 0.38$ нм и $\Delta\lambda = 0.365$ нм, соответственно. При дальнейшем увеличении толщины слоя Мо, значения коэффициента отражения и спектральной ширины падают, но, тем не менее, остаются выше, чем у «чистой» системы.

В результате подгонки кривых рентгеновского отражения на разных длинах волн от МРЗ Be/Ru с буферными слоями Мо на разных границах раздела были получены кривые электронной плотности по глубине (рис. 2.17) и значения ширин переходных слоев.

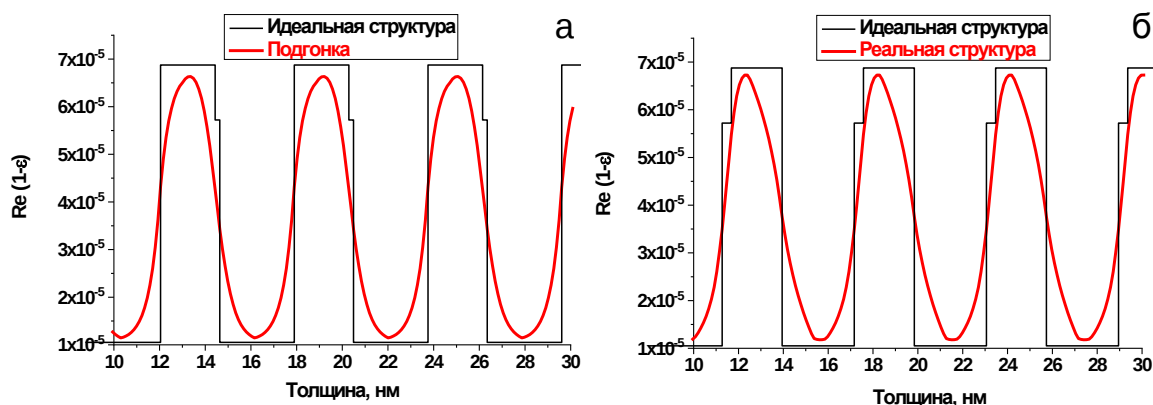


Рисунок 2.17 - Восстановленные по данным рентгеновской рефлектометрии профиль электронной плотности в МРЗ Be/Mo/Ru (а) и МРЗ Ru/Mo/Be (б).

Добавление буферных слоев как на одну, так и на другую границу раздела приводит к меньшему перемешиванию материалов системы между собой, однако полностью внедрение материалов системы друг в друга не предотвращает. При этом, уменьшение ширин переходных областей, относительно «чистой» системы незначительно. Так, добавление буферного слоя Мо на границу Ru-на-Ве уменьшает ширину переходного слоя до уровня $s=0.9-1.0$ нм, а на границу Ве-на-Ru не приводит к изменению значения ширины переходного слоя: $s=0.45$ нм.

После определения оптических характеристик МРЗ Ru/Be с буферным слоем Мо на разных границах раздела, были изготовлены МРЗ Ru/Be с буферным слоем Мо на обеих границах раздела одновременно. Толщины буферных слоев Мо были выбраны 0.2 нм и 0.4 нм, т.к. при таких толщинах на разных границах достигались наибольшие значения коэффициента отражения и спектральной ширины на рабочей длине волны.

На рисунке 2.18 представлены зависимости коэффициента отражения – а) и спектральной ширины – б) от МРЗ Мо/Be/Mo/Ru, измеренные на длине волны 11.4 нм от толщины слоев Мо в периоде. Значение $Mo=0$ соответствует МРЗ Ru/Be без буферных слоев Мо.

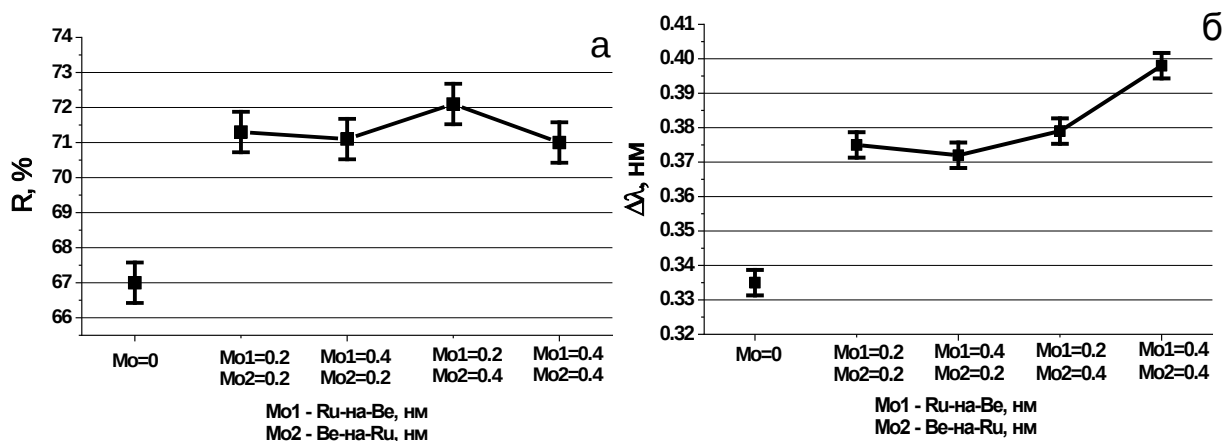


Рисунок 2.18 - Зависимости коэффициента отражения – а) и спектральной ширины – б) МРЗ Mo/Be/Mo/Ru на длине волны 11.4 нм от толщины слоев Mo в периоде.

Добавление буферных слоев Mo на обе границы раздела привело к существенному улучшению рентгенооптических характеристик. Максимальное значение коэффициента отражения составило $R=72.2\%$ при толщинах буферных слоев Mo: Ru-на-Be – 0.2 нм, а Be-на-Ru – 0.4 нм, что соответствует значениям толщин Mo у МРЗ Ru/Be с буферным слоем Mo на одной границе раздела, где достигаются наилучшие отражательные характеристики. Также следует отметить, что при всех изученных значениях толщин буферных слоев Mo, коэффициент отражения выше 70%, а спектральная ширина отражения шире, чем у МЗ Ru/Be без буферных слоев Mo. Полученные отражательные характеристики так же выше, чем в МРЗ Mo/Be [34] и МРЗ $\text{Mo}_x\text{Ru}_{1-x}/\text{Be}$ [32], что делает именно эту систему самой предпочтительной для литографии нового поколения.

В результате подгонки кривых рентгеновского отражения на разных длинах волн, были получены профили электронной плотности, распределения материала по глубине (рис. 2.19) и значения ширин переходных границ.

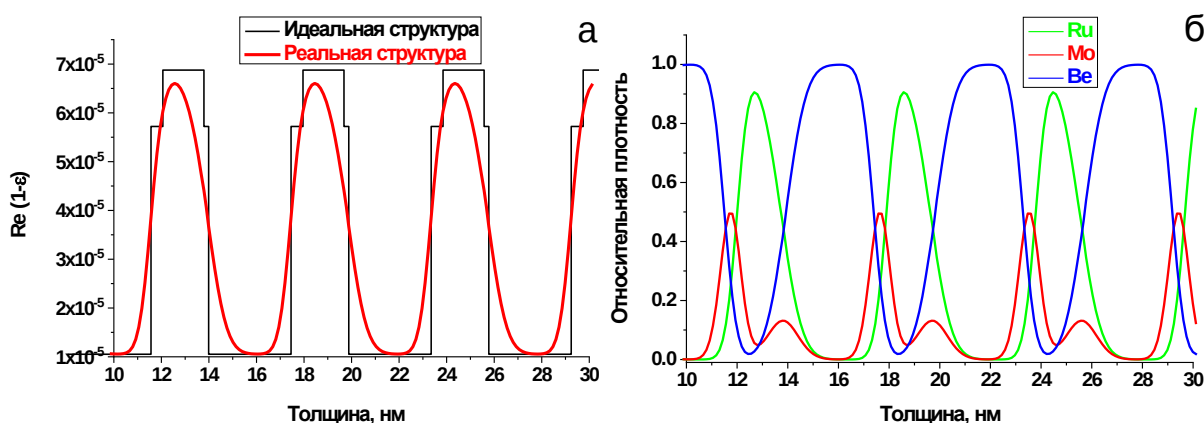


Рисунок 2.19 - Восстановленные по данным рентгеновской рефлектометрии профиль электронной плотности (а) и распределение материалов по глубине (б) в Be/Mo/Ru/Mo многослойных зеркалах.

Если сравнить аналогичные кривые для МРЗ Ru/Be без буферных слоев Mo (рис. 2.14), то можно увидеть, что величины ширин переходных границ изменились незначительно: переходной слой Be-на-Ru остался неизменным $s(\text{Be-на-Ru}) \approx 0.45$ нм, а ширина переходного слоя Ru-на-Be уменьшилась до уровня $s(\text{Ru-на-Be}) \approx 0.8$ нм. Эти значения несколько выше, чем в МРЗ Mo/Be [34], однако ниже, чем у МРЗ Ru/Be без буферных слоев Mo. Дополнительным эффектом, приводящим к увеличению коэффициента отражения в МРЗ Mo/Be/Mo/Ru является меньшее перемешивание Ru и Be слоев. На профиле электронной плотности появляется область чистого Be, чего не было в МРЗ Ru/Be. Наблюдаемое некоторое уменьшение плотности Ru обусловлено замещением (уменьшением) его части буферными слоями Mo. При этом, значение шероховатости практически не изменяется, что подтверждается измерениями диффузного рассеяния рентгеновского излучения (рис. 2. 20).

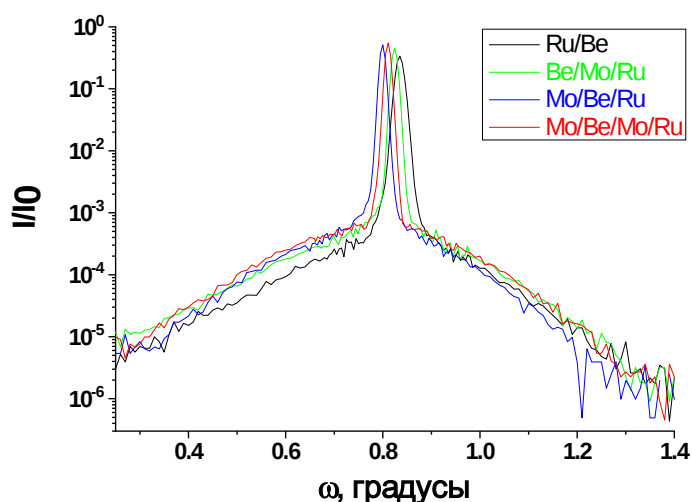


Рисунок 2.20 - измерения диффузного рассеяния МРЗ Ru/Be с и без буферных слоев Мо на границах раздела.

Таким образом, из рефлектометрических данных следует, что буферные слои Мо играют роль антидиффузионных барьеров между слоями Ru и Be. К сглаживающему эффекту они не приводят.

Одним из дополнительных подтверждений данных выводов являются дифрактометрические измерения. На рисунке 2.21 и в таблице 2.3 представлены результаты измерений и обработки рентгеновского фазового анализа от МРЗ Ru/Be с и без буферных слоев Мо на границах раздела. Вертикальными линиями на рисунке 2.20 (б) указаны табличные положения различных фаз Мо, Ru и их сплавов, а также Si в области регистрируемых в эксперименте дифракционных пиков.

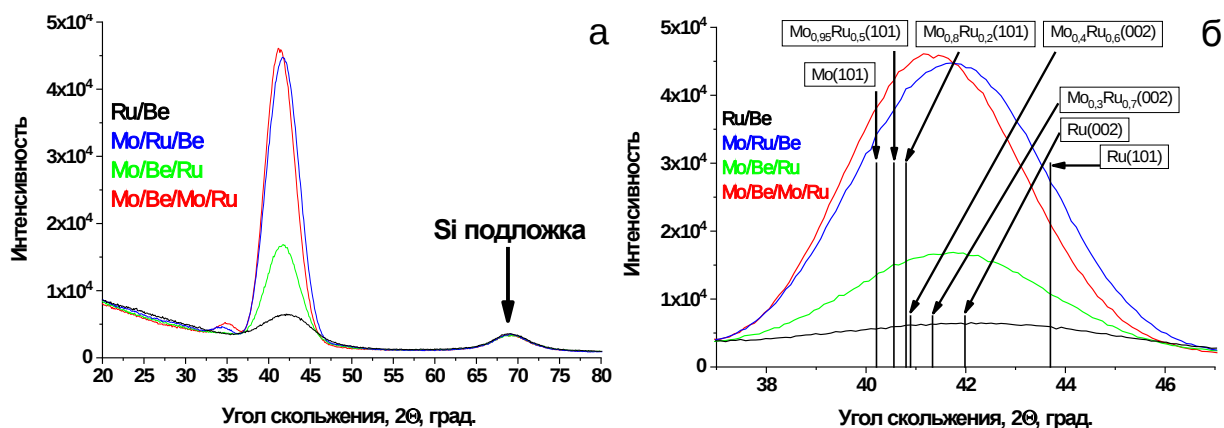


Рисунок 2.21 - рентгеновский фазовый анализ от систем Ru/Be с и без буферных слоев Мо на границе раздела.

Таблица 2.3 - результат обработки рентгеновского фазового анализа.

Структура	Толщина Мо, нм	2θ , °	ОКР, нм
Ru/Be	0	42.299°	1.41
Be/Mo/Ru	0.2	42.059°	1.88
	0.4	41.741°	1.87
	0.6	41.438°	1.79
Mo/Be/Ru	0.2	41.974°	1.79
	0.4	41.711°	1.83
	0.6	41.482°	1.94
Mo1/Be/Mo2/Ru	Mo1 – 0.2, Mo2 – 0.2	41.777°	1.63
	Mo1 – 0.2, Mo2 – 0.4	41.654°	1.93
	Mo1 – 0.4, Mo2 – 0.2	41.614°	2.00
	Mo1 – 0.4, Mo2 – 0.4	41.408°	2.06

Как видно из данных рентгеновского фазового анализа – наблюдается только один пик. Положение пика от МРЗ Ru/Be близко к положению рефлекса фазы Ru (002) с гексагональной плотнейшей упаковкой (ГПУ). Это связано с характерной текстурой ГПУ металлов, которая свойственна металлическим пленкам, получаемым методом магнетронного осаждения. При добавлении буферного слоя Мо в МРЗ Ru/Be пик смещается в сторону меньших углов. Величина смещения тем больше, чем больше толщина слоя Мо и чем меньше толщина слоя Ru в периоде МРЗ. Положение пика при максимальной толщине Мо в периоде МРЗ, близко к положению рефлекса (002) для фазы твердого раствора $\text{Mo}_{0.3}\text{Ru}_{0.7}$ на основе ГПУ структуры Ru. При этом, интенсивность пика возрастает с увеличением толщины слоя Мо и, следовательно, уменьшением толщины слоя Ru в периоде. Также, уменьшается ширина пика на полувысоте, что свидетельствует об увеличении размеров области когерентного рассеяния (ОКР), т.е. «размера кристаллита».

Для объяснения наблюдаемых эффектов были выдвинуты предположения, что данная зависимость появляется или из-за дополнительного текстурирования слоев Ru, или же из-за увеличения эффективной толщины «когерентно рассеивающего» слоя Ru при добавлении буферного слоя Мо в МРЗ. Для определения угла рассеяния текстуры были измерены кривые

качания у образцов «чистого» Be/Ru и Ru/Be с буферными слоями Mo. Ширина пика кривой качания (угла текстуры) не изменяется при изменении толщины Ru и Mo в периоде МРЗ и составляет 11-12°. Следовательно, изменение интенсивности пика не связано с дополнительным текстурированием слоев из-за добавления Mo в МРЗ. Такое изменение амплитуды пика мы связываем с увеличением эффективной толщины «когерентно рассеивающего» слоя Ru в МРЗ. Эффективная толщина Ru возрастает из-за лучшего «разделения» слоев многослойной системы, на что также указывает обработка рентгеновского отражения, вследствие чего и улучшается отражательная способность рентгеновского зеркала.

Вторым подтверждением вывода о том, что буферные слои Mo играют роль антидиффузионных барьеров между слоями Ru и Be, служат результаты измерений методом ВИМС. На рисунке 2.22 приведены измерения ВИМС от «чистого» МРЗ Ru/Be.

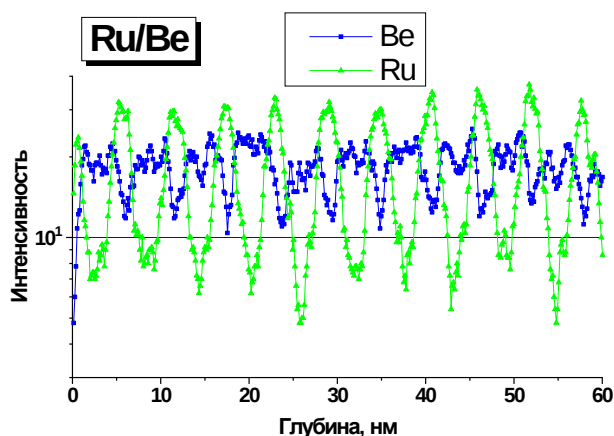


Рисунок 2.22 - Измерения ВИМС от МРЗ Ru/Be.

На рисунке 2.21 приведены амплитудные значения измерений ВИМС от МРЗ Ru/Be. Нормированные значения концентрации элементов не приводятся из-за влияния матричных эффектов на амплитуду и отсутствие эталонных образцов разных концентраций для учета данного влияния. Подробнее о матричных эффектах и необходимости эталонных образцов можно посмотреть в [81]. В этой связи, все результаты измерений методом ВИМС будут

представлены с амплитудными значениями материалов системы, а не нормированными концентрационными.

На рисунках 2.23 и 2.24 приведены результаты ВИМС измерений МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на разных границах раздела (рис. 2.23) и на обеих границах раздела одновременно (рис. 2.24).

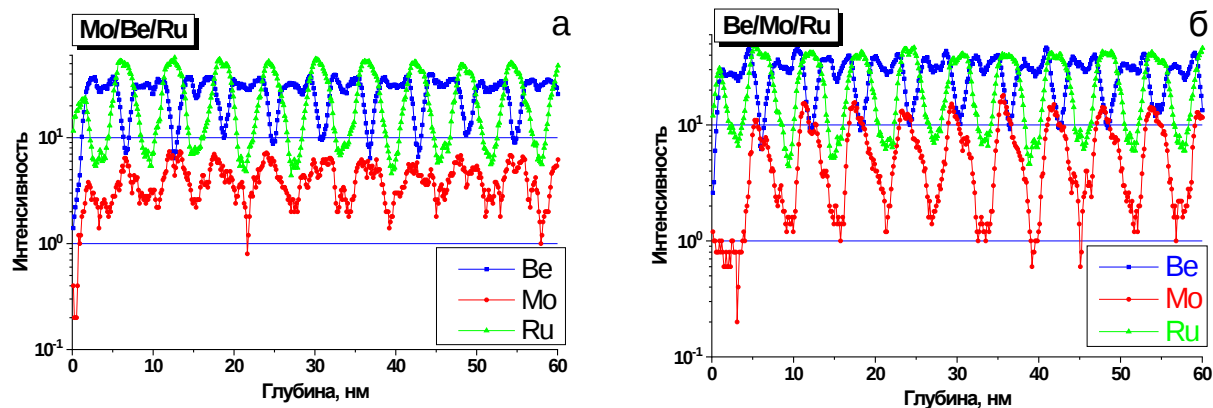


Рисунок 2.23 - Измерения ВИМС МРЗ Be/Ru с буферными слоями Mo на разных границах раздела: Mo/Be/Ru (а) и Be/Mo/Ru (б).

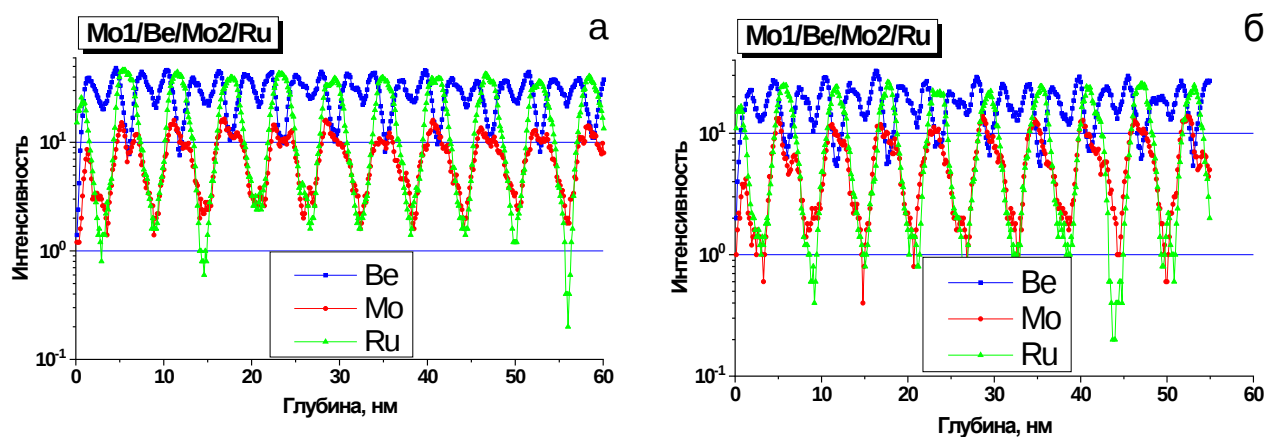


Рисунок 2.24 - Измерения ВИМС МРЗ $Mo_1/Be/Mo_2/Ru$ с буферными слоями Mo на обеих границах раздела: $Mo_1=0.2$ нм и $Mo_2=0.4$ нм (а) и $Mo_1=0.4$ нм и $Mo_2=0.4$ нм (б).

При добавлении буферного слоя Mo на любую одну границу раздела происходит увеличение амплитуды и Be, и Ru. Однако, максимальное увеличение амплитуды, достигается при добавлении буферных слоев Mo на обе границы раздела одновременно. На рисунке 2.25 приведены сравнительные

результаты ВИМС «чистого» МРЗ Ru/Be и МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на обеих границах раздела одновременно.

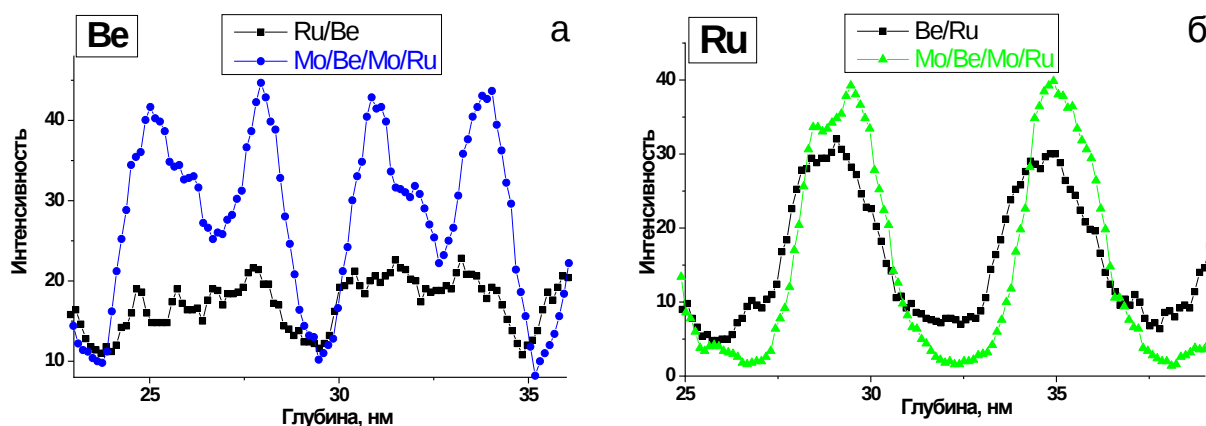


Рисунок 2.25 – Сравнительные результаты измерения ВИМС материалов Be (а) и Ru (б) от «чистого» МРЗ Ru/Be и МРЗ Mo/Be/Mo/Ru.

Добавление буферных слоев Mo на обе границы раздела в МРЗ Ru/Be увеличило амплитуду для Be и Ru в ~ 2 раза от исходного значения. Увеличение амплитуды указывает на меньшее перемешивание материалов МРЗ между собой, что подтверждает все ранние предположения: в результате меньшего перемешивания материалов происходит улучшение отражательных характеристик МРЗ, а также рост эффективной толщины «когерентно рассеивающего» слоя Ru, которая на картинах рентгеновского фазового анализа дает рефлекс. Еще большее увеличение амплитуды, а значит и меньшее перемешивание, наблюдается у МРЗ Ru/Be с еще большими толщинами буферных слоев Mo на обеих границах раздела (рис. 2.25 б), однако она обладает меньшими отражательными характеристиками из-за меньшей рентгенооптической выгоды такой системы – на рабочей длине волны 11.4 нм, Ru более предпочтителен в качестве рассеивающего материала, чем Mo.

2.2.3 Изучение временной стабильности отражательных характеристик

Для ряда приложений, в частности для применения МРЗ в литографии, необходима временная стабильность отражательных характеристик в течении

длительного времени. Для установления временной стабильности отражательных характеристик, коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм от МРЗ Ru/Be с и без буферных слоев Мо на границах раздела был измерен сразу после изготовления МРЗ и после двух лет хранения МРЗ на воздухе. График зависимости коэффициента отражения от времени представлен на рисунке 2.26.

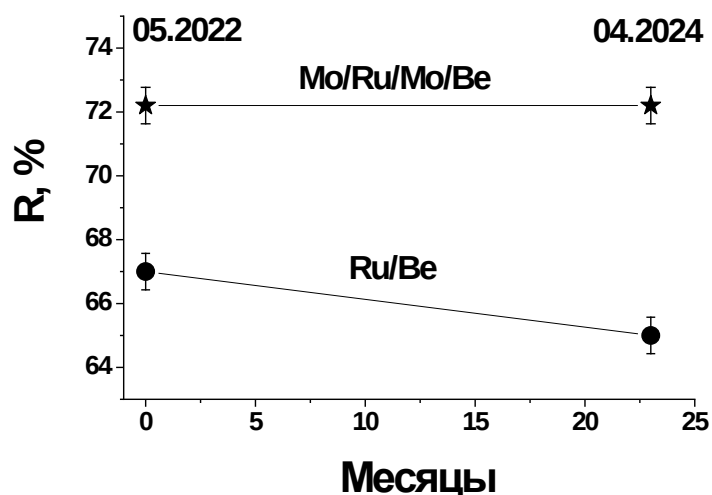


Рисунок 2.26 – Значения коэффициентов отражения при $\lambda=11.4$ нм МРЗ Ru/Be и Mo/Ru/Mo/Be в зависимости от времени после их изготовления.

МРЗ Ru/Be без буферных слоев Мо снизило отражательную способность на 2% в абсолютных и на 3% в относительных единицах за 23 месяца. Причиной такого снижения коэффициента отражения может быть дополнительное перемешивание слоев Ru и Be в МРЗ между собой за счет диффузии в течение длительного периода после изготовления. В свою очередь МРЗ Mo/Ru/Mo/Be сохранило свою отражательную способность, в пределах погрешности измерения, в течение 23 месяцев, что говорит о высокой стабильности микроструктуры слоев в этом МРЗ с течением времени — дальнейшего перемешивания с последующим ухудшением характеристик отражения не происходит. Это еще раз подтверждает, что прослойки Мо являются отличными барьерами против перемешивания слоев Ru и Be между собой в Ru/Be MLM.

2.1.4 Изучение внутренних напряжений

Как говорилось ранее, немаловажной проблемой у отражающих покрытий является наличие внутренних напряжений, которые неизбежно приводят к деформации подложки, на которую они осаждаются. Знание о значениях внутренних напряжений позволят заранее предопределить деформации, которые возникнут при осаждении отражающего покрытия на подложку и предопределить способы ее избегания.

Для исследования внутренних механических напряжений, была изготовлена серия МРЗ Ru/Be и Ru/Be с буферными слоями Mo на границах раздела с периодами $d \sim 5.8$ нм. На рисунке 2.27 приведены значения внутренних напряжений в МРЗ Ru/Be в зависимости от доли толщины Ru в периоде МРЗ ($\gamma = t(\text{Ru})/d$).

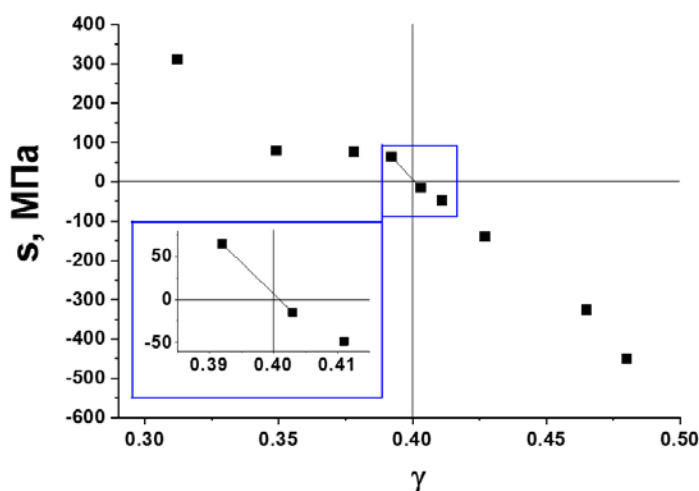


Рисунок 2.27 – Значения внутренних напряжений в МРЗ Ru/Be в зависимости от толщины слоя Ru ($\gamma = t(\text{Ru})/d$).

Для наивысшего уровня отражательной способности $R=67\%$ при $\gamma \sim 0.47$ (рис. 2.13) в МРЗ Ru/Be, величина внутренних напряжений находится на уровне $s \sim -390$ МПа (сжимающее напряжение). Уменьшение параметра γ приводит к росту растягивающих напряжений. Из этого можно сделать вывод, что слои Ru подвержены сжимающим напряжениям, а слои Be – растягивающим. Нулевое значение внутренних напряжений достигается при $\gamma \sim 0.4$. При таком значении γ ,

коэффициент отражения составляет $R \sim 62\%$ (рис. 2.14). Незначительное изменение величины внутренних напряжений при уменьшении γ от 0.39 до 0.35 предположительно связано с тем, что чистые слои Ве имеют более низкий уровень растягивающих напряжений, чем смесь Ru-Ве. Как говорилось ранее, известно, что при большом значении γ , МРЗ Ru/Ве состоит не из чистых слоев Ru и Ве, а из слоев Ru и сплава Ru-Ве [30, 32]. При уменьшении γ , содержание Ru уже недостаточно для смешивания всего слоя Ве с Ru, поэтому слои Ве состоят из чистого Ве и сплава Ru-Ве. При дальнейшем уменьшении γ снова происходит рост растягивающих напряжений.

В таблице 2.4 приведены значения внутренних напряжений в МРЗ Ru/Ве с буферными слоями Мо на различных границах раздела в зависимости от толщины слоя Мо в периоде.

Таблица 2.4 Значения внутренних напряжений в МРЗ Ru/Ве с буферными слоями Мо на различных границах раздела в зависимости от толщины слоя Мо в периоде.

Структура	$t(\text{Mo})$, нм	s , МПа, ± 2 МПа
Ru/Ве	0	-319.8
Mo/Ru/Ве (Мо-на-Ве)	0.2	-322.5
	0.26	-414.6
Ru/Mo/Ве (Мо-на-Ru)	0.2	+18.8
	0.4	+190.6

Как видно из таблицы. 2.4, нанесение буферных слоев Мо на Ве приводит к небольшому росту сжимающих напряжений. А нанесение буферных слоев Мо на Ru — к значительному росту растягивающих напряжений. Из литературных данных [50-52] известно, что в слоях Мо на начальных стадиях роста возникают растягивающие напряжения. Это объясняет их рост в случае нанесения буферных слоев Мо на слои Ru, поскольку Ru имеет сжимающие напряжения. Таким образом, рост сжимающих напряжений в случае нанесения прослойки Мо на Ве объясняется и хорошо согласуется с ранее описанным

предположением: величина растягивающих напряжений в смеси Ru-Be выше, чем в чистом слое Be. В этом случае из-за меньшего содержания сплава Ru-Be, общая величина напряжений может иметь меньший элемент растяжения, чем в случае большего содержания сплава, а значит, влияние сжимающего слоя Ru более существенно. Также близкие к нулю значения внутренних напряжений наблюдаются в МРЗ Ru/Mo/Be с толщиной Mo=0.2 нм, где $s=+18.8$ МПа.

В таблице 2.5 приведены значения коэффициентов отражения и внутренних напряжений в МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на обеих границах раздела одновременно в зависимости от толщины слоя Mo в периоде.

Таблица 2.5 Значения коэффициентов отражения и внутренних напряжений в МРЗ Ru/Be с прослойками Mo на обеих границах раздела одновременно.

Структура	t(Mo), нм	R, %, $\pm 0.6 \%$	s, МПа, ± 2 МПа
Ru/Be	0	67	-319.8
Mo/Ru/Mo/Be	на-Be—0.2 на-Ru—0.2	71.2	-42.9
	на-Be—0.2 на-Ru—0.4	72.2	+94.9

Нанесение буферных слоев Mo на обе границы раздела одновременно привело к общему увеличению растягивающих напряжений. Это логически совпадает с результатами, описанными выше — в целом увеличение растягивающих напряжений за счет уменьшения толщины слоя Ru и добавления буферных слоев Mo на Ru превышает уменьшение растягивающих напряжений за счет меньшего образования сплава Ru-Be.

Важным стоит отметить, что при изменении толщины буферного слоя Mo-на-Be с 0.2 нм до 0.4 нм произошел переход от отрицательных значений напряжений (сжимающие) в положительные значения (растягивающие). Это однозначно указывает на то, что между этими значениями толщины буферного слоя Mo существует бесстрессовое состояние ($s=0$ МПа). При этом, уровень отражательной способности будет между значениями $71.2\% < x < 72.2\%$.

2.3 Сравнение эффективности 12-ти зеркальной оптической системы литографа на длинах волн 13.5 и 11.2 нм

Для понимания того, будет ли литография нового поколения иметь лучшие или близкие технические параметры, в первую очередь используют понятие оптической эффективности литографической системы. Под этим понятием подразумевается – какое количество исходного излучения, после прохождения всех оптических элементов литографической установки, попадет на фоторезист и будет задействовано в его засветке. Чем этот параметр выше, тем больше исходного света попадет на подложку с фоторезистом и, следовательно, будет необходимо меньше времени на его засветку. В свою очередь, это влияет на производительность литографической установки – количество выпускаемых пластин в час.

Производительность литографического процесса пропорциональная параметру:

$$\xi = \int I(E)R(E)^n T(E)^k dE \quad (2.1)$$

где, $I(E)$ – интенсивность излучения источника, $R(E)$ – энергетическая зависимость коэффициента отражения зеркал оптической системы, $T(E)$ – коэффициент пропускания фильтров оптической системы, n и k – количество отражающих оптических элементов и фильтров, соответственно, E – энергия в эВ.

В литографических установках на длинах волн 13.5 нм и 11.2 нм будут разные интенсивности источников излучения, разное количество фильтров и у фильтров будут разные значения коэффициентов пропускания. Для расчета эффективности отражательной части оптической системы литографической установки ограничимся только членом $R(E)$, т.к. предметом данной диссертационной работы является разработка МРЗ с улучшенными рентгенооптическими характеристиками. Тогда формула для ξ будет иметь вид:

$$\xi = \int R(E)^n dE \quad (2.2)$$

Самые высокие экспериментально достигнутые отражательные характеристики на длине волны 13.5 нм имеют МРЗ на основе Mo/Si – Mo/B₄C/Si [46]: R=70.15%, $\Delta\lambda=0.5$ нм. Оптическую эффективность данной системы будем сравнивать с оптической эффективностью наших систем, работающих на длинах волн 11.2 нм: Mo/Be [34]: R=70.2%, $\Delta\lambda=0.26$ нм и Ru/Be: R=72.2%, $\Delta\lambda=0.38$ нм. В таблице 2.6 приведены расчеты эффективностей 12-ти зеркальных оптических систем, и эффективности данных систем относительно системы на основе Mo/Si для литографии на 13.5 нм.

Таблица 2.6 - Сравнение эффективности оптических систем литографических установок на длинах волн 13.5 нм и 11.2 нм, рассчитанные для рекордных значений коэффициентов отражения МРЗ.

Структура	Оптические характеристики	ξ , эВ	ξ (структура) / ξ (Mo/Si), %
Mo/Si	R=70.15, $\Delta\lambda=0.5$ нм	0.0220106	100 %
Mo/Be	R=70.2%, $\Delta\lambda=0.26$ нм	0.0176049	80 %
Ru/Be	R=72.2%, $\Delta\lambda=0.38$ нм	0.0299158	136 %

Согласно расчетам, оптическая система на основе Ru/Be оптики имеет на 36% большую оптическую эффективность, а оптическая система на основе Mo/Be оптики на 20% меньшую оптическую эффективность, чем оптическая система на основе Mo/Si оптики для литографии на длине волны 13.5 нм.

Большая эффективность оптической системы на основе Ru/Be оптики показывает, что создание литографии нового поколения на более короткой длине волны (11.2 нм) может иметь преимущество перед литографией на 13.5 нм.

Также, в случае с литографией на 11.2 нм, в качестве источника излучения будет служить ксеноновая плазма (мишень из инертного газа), а не твердотельная (олово), как на 13.5 нм. Это приведет к тому, что потребуется меньшее количество фильтрующих элементов, что дополнительно повысит

общую эффективность литографической системы. В свою очередь, это может помочь нивелировать разницу в эффективности излучения ксенонового источника излучения по сравнению с оловянным и получить общую эффективность литографической установки на схожем или даже более высоком уровне с таковой на 13.5 нм.

2.4 Основные результаты по главе 2

В главе изучены отражательная способность, микроструктура слоев и интерфейсов, и термическая стабильность Mo/Be и Ru/Be МРЗ. Данные зеркала являются перспективными для литографии на длине волны в окрестности 11.2 нм.

В рамках проведенных исследований получены следующие важнейшие результаты:

1. Переходные области в МРЗ Mo/Be состоят из двух соединений. На границе Mo-на-Be образуется соединение с малым содержанием бериллия – MoBe_2 . На границе Be-на-Mo образуется соединение с большим содержанием бериллия – MoBe_{12} или MoBe_{22} . Вакуумный отжиг при 1 часе до температуры 300°C не приводит к изменению микроструктуры и происходит рост коэффициента отражения из-за перераспределения кислорода внутри МРЗ. Вакуумный отжиг в течении 4 часов приводит к изменению микроструктуры и происходит падение коэффициента отражения.

3. Отражательные характеристики МРЗ Ru/Be ($R=66\%$, $\Delta\lambda=0.38$ нм) ограничены широкими переходными границами раздела (Ru-на-Be~1 нм, Be-на-Ru~0.4 нм) и перемешиванием материалов слоев между собой.

4. Добавление буферных слоев Mo на границы раздела в МРЗ Ru/Be приводит к улучшению оптических характеристик. Получено рекордное значение коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм, которое составило $R\sim 72.2\%$. Причиной улучшения оптических характеристик служит меньшее перемешивание слоев многослойной системы между собой и уменьшение ширины переходной границы Ru-на-Be до 0.8 нм, в следствии чего происходит

увеличение оптического контраста. МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo на обоих границах раздела обладает временной стабильностью оптических характеристик как минимум в течении двух лет хранения на воздухе. Получены околонулевые значения внутренних механических напряжений и доказано существование бесстрессового состояния ($\sigma=0$ МПа) в МРЗ Mo/Ru/Mo/Be при сохранении высокого уровня отражательной способности ($R>71\%$) на длине волны 11.4 нм.

4. Эффективность оптической системы литографической установки, рассчитанная для рекордных значений коэффициентов отражения Mo/Si на длине волны 13,5 нм и Ru/Be на длине волны 11,2 нм, у системы на основе Ru/Be оптики будет на $\sim 36\%$ выше.

По результатам исследований опубликованы следующие работы [A1 - A5, A8, A9, A12, A15, A19], [T1, T2, T4, T5, T7, T9, T11, T12, T15, T18, T19], [П1].

Глава 3. Поиск и изучение отражающих покрытий для динамической маски для безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм

В главе изучены коэффициенты отражения, механические и электропроводные свойства многослойных отражающих покрытий, перспективных для нанесения на поверхность МЭМС микрозеркал которые, в свою очередь, могут быть использованы для безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм. Синтез изучаемых образцов проводился методом магнетронного осаждения в среде: аргон и аргон + химически активный газ. В качестве химически активного газа выступали: азот, кислород или водород. Рентгенооптические свойства систем определялись методами рентгеновской рефлекто- и дифрактометрии. Внутренние напряжения структуры определялись по измерению радиусов кривизны подложки. Электросопротивление системы определялось 4-х контактным методом.

Осаждение многослойного покрытия на МЭМС микрозеркал вводит ряд ограничений. Из-за малой толщины микрозеркал (порядка несколько сотен нм), соизмеримых с общей толщиной осаждаемой многослойной системы, остро встает вопрос необходимости осаждения бесстрессового покрытия, которое не приведет к искажению поверхности микрозеркала. Грубые теоретические оценки по формуле (1.1) показывают, что для сохранения плоскостности микрозеркал на уровне 10 нм, уровень внутренних механических напряжений не должен превышать $|s| \leq 10$ МПа. При нанесении многослойного отражающего покрытия часть конденсата попадает между микрозеркалами, часть рассеивается, что может привести к электрическим закороткам и потери работоспособности МЭМС. В данной главе исследуются многослойные системы, обеспечивающие одновременно диэлектрические свойства, минимальные внутренние напряжения и заметные коэффициенты отражения на длине волны 13.5 нм.

Под понятием «заметные коэффициенты отражения» подразумевается значение, которое примерно на порядок не уступает таковому у «основных» зеркал в литографической установке. На длине волны 13.5 нм, максимальная отражательная способность зеркал составляет $R=70.15\%$ [46] (п. 2.3). Маска в литографической установке является только одним элементом из всех. Уменьшение отражательной способности у одного элемента в $10 \div 100$ раз приведет к падению производительности в $\sim 10 \div 100$ раз. Т.к. для безмасочной литографии производительность не является настолько острой проблемой, как для масочной, то уменьшение коэффициента отражения даже в десятки раз, относительно других оптических элементов, не будет критической проблемой.

3.1 МРЗ Mo/Be/Si

3.1.1 Внутренние напряжения и отражательная характеристика МРЗ Mo/Be/Si

В окрестности длины волны 13.5 нм традиционно используются МРЗ Mo/Si. В данной работе были изготовлены и исследованы МРЗ Mo/Si с периодами $d \sim 7$ нм с разным соотношением толщин слоев Mo и Si в периоде ($\gamma = t(\text{Mo})/d$) и определены значения внутренних напряжений для каждого значения γ . Данные представлены на рисунке 3.1.

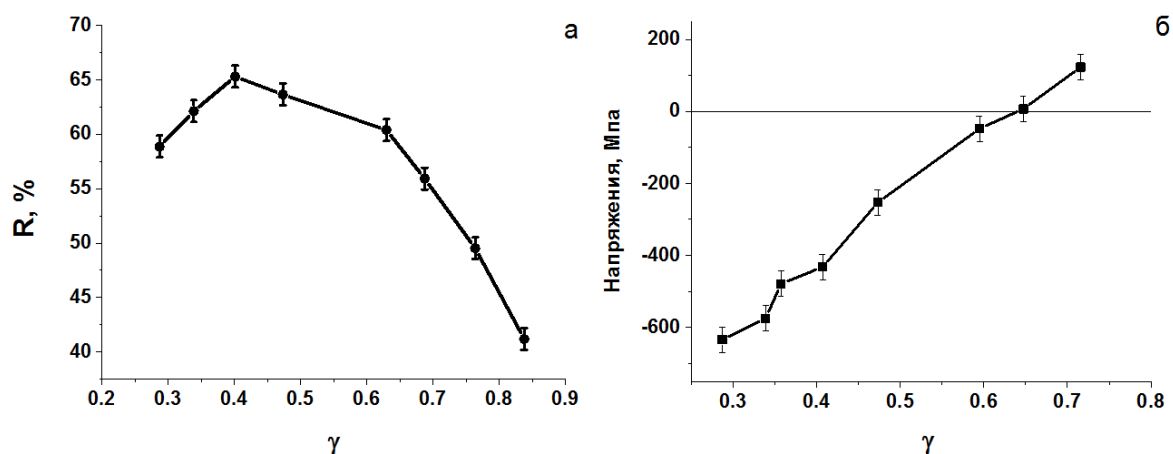


Рисунок 3.1 - Зависимости коэффициента отражения и внутренних напряжений рентгеновских зеркал Mo/Si от соотношения толщин слоя Mo к периоду.

Нулевое значение напряжений в МРЗ Mo/Si, приходится на величину $\gamma \sim 0.64$ ($t(\text{Mo}) \sim 4.5$ нм). Однако, при таком соотношении толщин слоев, поглощение рентгеновского излучения увеличивается, что приводит к спаду коэффициента отражения до уровня $R < 60\%$. График зависимости коэффициента отражения в системе имеет стандартный вид, где максимум отражения приходится на долю молибдена в периоде $\gamma \sim 0.4$.

Для получения бесстрессового и высокоотражающего покрытия было предложено объединить физические свойства МРЗ Mo/Si и Mo/Be. МРЗ Mo/Si в максимуме отражения на длине волны 13.5 нм имеет значение напряжений на уровне ~ -450 МПа, а МРЗ Mo/Be в максимуме отражения на длине волны 11.2 нм на уровне $\sim +450$ МПа. Также, оптические характеристики Be и Si на длине волны 13.5 нм очень близки, что позволит взаимозамещать их без заметного ухудшения отражательной способности зеркала. В частности, в [49] сообщается, что МРЗ Mo/Be/Si обеспечила рекордный коэффициент отражения, около 72%, на длине волны 13.5 нм.

Для исследования влияния толщины Be на напряжения в МРЗ Mo/Si, была выбрана толщина Mo, которая обеспечивает наибольшую отражательную способность в МРЗ Mo/Si ($t(\text{Mo}) \sim 2.8$ нм). Толщина слоев Si при этом уменьшалась на такое же значение, на которое увеличивалась толщина Be для сохранения значения периода МРЗ.

На рисунке 3.2 представлены зависимости измеренных коэффициентов отражения на длине волны 13.5 нм и значения внутренних напряжений в МРЗ Mo/Be/Si от соотношения толщины слоя Si к периоду.

Коэффициент отражения в МРЗ Mo/Be/Si практически не зависит от толщины Si, а, следовательно, и Be в системе, и оставляет $R \sim 66-67\%$ во всем диапазоне толщин слоев. При этом, значение внутренних напряжений уменьшается с уменьшением доли слоя Si. Нулевое значение напряжения достигается при соотношении толщины Si к периоду $t(\text{Si}) / d \sim 0.14$, т.е. толщина Si ~ 1 нм. При дальнейшем уменьшении слоя кремния происходит рост растягивающих напряжений.

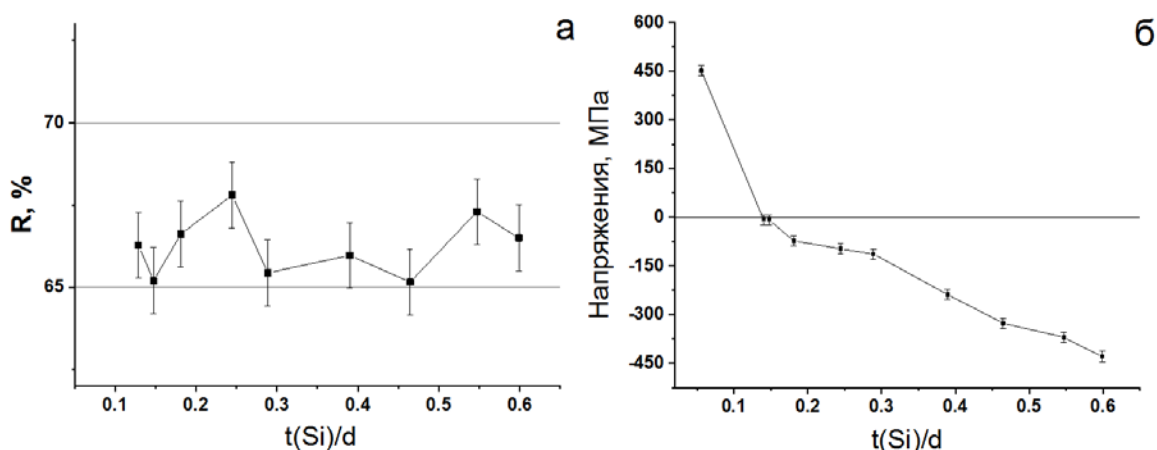


Рисунок 3.2 - Зависимости коэффициента отражения и значения внутренних напряжений МРЗ Mo/Be/Si от соотношения толщины слоя Si к периоду.

3.1.2 Осаждение МРЗ Mo/Be/Si на поверхность динамической маски

Отражающее покрытие Mo/Be/Si в бесстрессовом состоянии было осаждено на поверхность двух МЭМС микрозеркал. В обоих случаях осаждение данного отражающего покрытия на поверхность матрицы микрозеркал не привело к искажению их формы. Уровень отражательной способности на рабочей длине волны 13.5 нм от поверхности матрицы микрозеркал составляет $R \sim 22.5\%$ на каждой из матриц. На рисунке 3.3 представлены фотография МЭМС с нанесенным покрытием (а) и спектральные зависимости коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм для обеих МЭМС (б и в).

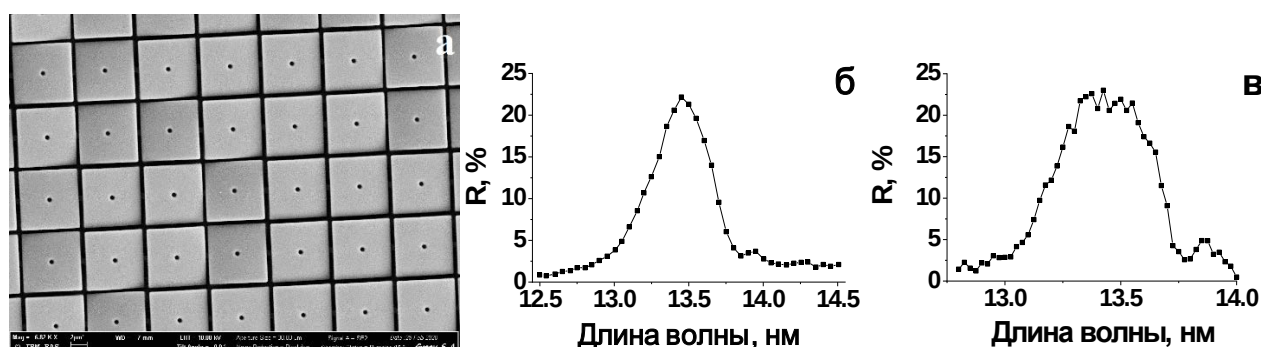


Рисунок 3.3 – Изображение системы микрозеркал с нанесенным многослойным Mo/Be/Si покрытием, полученное на электронном микроскопе Neon (а) и спектральные зависимости коэффициентов отражения двух образцов матриц микрозеркал с отражающим покрытием Mo/Be/Si (б) и (в).

Полученные, близкие к нулевым, деформации микрозеркал, из-за отсутствия механических напряжений, и коэффициент отражения более 20% уже представляют интерес для применения в безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм. Однако МЭМС, после нанесения МРЗ Mo/Be/Si теряла работоспособность. В свою очередь, осаждение на поверхность МЭМС микрозеркал пленки Si, толщиной порядка 300 нм приводило к сильной деформации микрозеркал, но МЭМС микрозеркал работоспособность не теряла. В связи с этим, возникает предположение, что из-за попадания металлического материала многослойной системы под поверхность микрозеркал и из-за достаточно хорошей электропроводности этих материалов происходило электрическое замыкание контактов под микрозеркалами и МЭМС теряла работоспособность.

Данное предположение подтверждается проведенным рентгенофлуорисцентным микроанализом поверхности динамической маски в разных координатах. Элементный анализ проводился на таких местах: на поверхности микрозеркал с и без отражающего покрытия; под поверхностью микрозеркал с и без отражающего покрытия; в области контактов под микрозеркалами. Измерения под микрозеркалами и измерения областей контактов проводились после удаления микрозеркал с поверхности матрицы. На рисунке 3.4 приведены примеры фотографий областей динамической маски без удаления микрозеркал с поверхности (рис. 3.4 а) и после удаления микрозеркал с поверхности (рис. 3.4 б).

Для измерения элементного состава под поверхностью микрозеркала, на поверхности динамической маски проводился поиск микрозеркала, который находится в перевернутом состоянии. Области контактов измерялись в местах пересечения микрозеркал и со смещением ближе к центру положения микрозеркала.

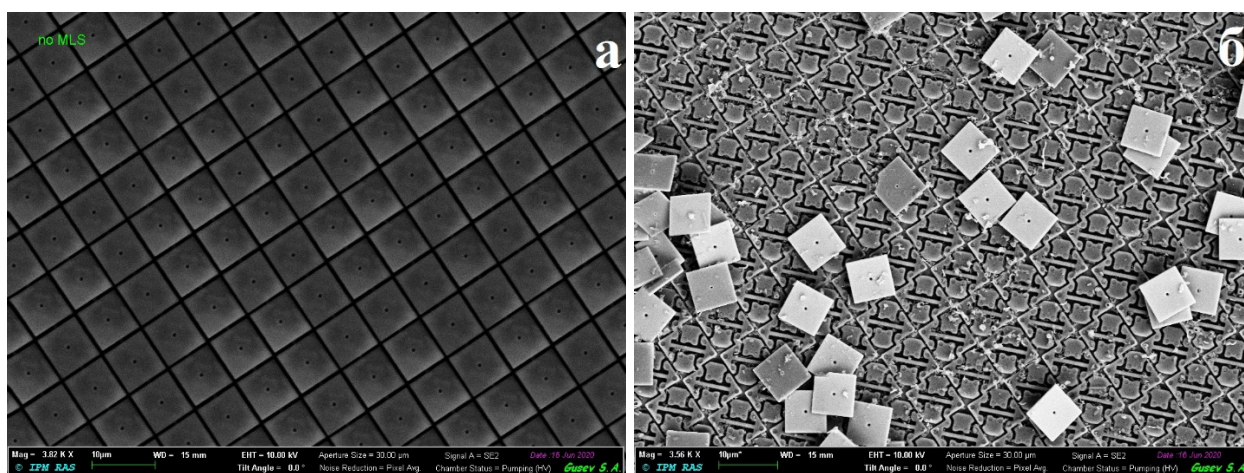


Рисунок 3.4 – примеры фотографий областей динамической маски без удаления микрозеркал (а) и после удаления микрозеркал с поверхности (б).

Элементный анализ производился с глубины много большей, чем толщина микрозеркала. По этой причине, при анализе поверхности микрозеркала, можно обнаружить состав «инструментов» – контактов, поверхности, подвижки микрозеркал и прочего, которые находятся под микрозеркалом. Также данную «ошибку» можно допустить при анализе области под микрозеркалом, т.к. происходит анализ всех «инструментов», которые находятся в данной области на глубине.

По результату элементного анализа можно утверждать, что микрозеркала состоят из алюминия или алюминия с малой концентрацией титана. Области контактов состоят из титана или титана с алюминием. Это подтверждается малой концентрацией титана при анализе поверхности микрозеркала в центральной части микрозеркала и повышенной, более чем в два раза, концентрацией титана при анализе области контактов.

Элементный анализ лицевой и обратной стороны микрозеркала без отражающего покрытия показывает одинаковое количество элементов, в пределах погрешности определения.

Элементный анализ поверхности микрозеркала с отражающим покрытием Mo/Be/Si дополнительно показывает наличие Mo и большую, чем исходная, концентрацию Si. Что ожидаемо – определяется состав отражающего

покрытия. Следов бериллия не обнаружено из-за невозможности определения Be данным методом.

Элементный анализ обратной стороны микрозеркала с отражающим покрытием Mo/Be/Si также показывает наличие и Mo и Si, но в меньшей концентрации, чем с лицевой стороны микрозеркала. Определение этих элементов с обратной стороны микрозеркала объясняется большой глубиной анализа.

Элементный анализ областей контактов динамической маски показывает наличие молибдена и кремния в области раздела микрозеркал. Подпыление элементами отражающего покрытия приходится на область порядка 1 – 1.5 мкм от области раздела микрозеркал. В областях под микрозеркалами, в отдалении на ~ 2 мкм, следов молибдена и кремния от отражающего покрытия не обнаружено. Это также доказывает отсутствие молибдена и кремния на обратной стороне микрозеркала. При наличии подпыления на обратную сторону микрозеркала, все области контактов должны были быть запылнены отражающим покрытием.

Не смотря на малую зону подпыления материала на область контактов, даже его достаточно для того, чтобы закоротить электрическую схему управления динамической маски.

Для решения этой проблемы в диссертационной работе был проведен поиск новых многослойных систем, обеспечивающих околонулевые внутренние механические напряжения ($|s| \leq 10$ МПа), диэлектрические свойства и высокие коэффициенты отражения на длине волны 13.5 нм одновременно. Под понятием «диэлектрический» подразумевается наличие удельного электросопротивления материала на уровне удельного электросопротивления пленки Si или больше: $\rho \sim 500 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$.

3.2 Поиск и исследование диэлектрических и бесстрессовых отражающих покрытий на длину волны 13.5 нм

Нанесение на МЭМС пленок аморфного кремния с незначительной долей нанокристаллической фазы, которые получают в наших условиях магнетронного распыления [82] приводило к сильной деформации поверхности микрозеркал, однако работоспособность МЭМС сохранялась. Измерить нашими методами удельное сопротивление пленок Si не удалось, поэтому в дальнейшем, при поиске новых систем, в качестве материала слабопоглощающих слоев мы выбрали Si. А исследования были направлены на поиск материала рассеивающих слоев.

3.2.1 Изучение систем на основе пары Mo/Si

Система Mo/Si, как писалось ранее, может обеспечить и достаточный уровень отражательной способности, и нулевое значение внутренних напряжений. Однако, она является электропроводящей, так как почти половина покрытия состоит из чистого металла – Mo. Таким образом, для повышения электросопротивления было решено изготавливать систему Mo/Si в среде, содержащей химически активные газы. В качестве основного газа оставался аргон – инертный газ, основная задача которого распылять мишень материала без какого-либо химического взаимодействия с распыляемым веществом. А основной задачей второго газа будет химическое взаимодействие с материалом пленок для образования плохо проводящих соединений. В качестве активного газа для работы с системой Mo/Si были выбраны азот и кислород.

3.2.1.1 МРЗ Mo/Si с N₂

В качестве первого варианта активного газа был выбран азот (N₂). Он был выбран по следующим причинам. Во-первых, он образует с молибденом нитрид, который обладает более высоким значением электросопротивления, чем чистый Mo. Во-вторых, с этим газом достаточно удобно работать, так как

не требуется соблюдение дополнительных мер предосторожности. Процентное содержание азота в смеси аргон+азот составляли: 13, 20, 30, 40 и 50% от общего объёма. Содержание азота в среде рабочего газа при осаждении как Mo, так и Si было одинаково. Общее рабочее давление в камере напылительной установки оставалось неизменным $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ торр.

Значения отражательной способности и электросопротивления МРЗ Mo/Si, изготовленной в среде рабочего газа аргон+азот сравнивались с таковыми значениями у «чистого» МРЗ Mo/Si, оптимизированного на максимум отражения на рабочей длине волны 13.5 нм.

На рисунке 3.5 приведен пример измерения МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$ с 20% азота в среде рабочего газа на рабочей длине волны 13.5 нм и на длине волны 0.154 нм.

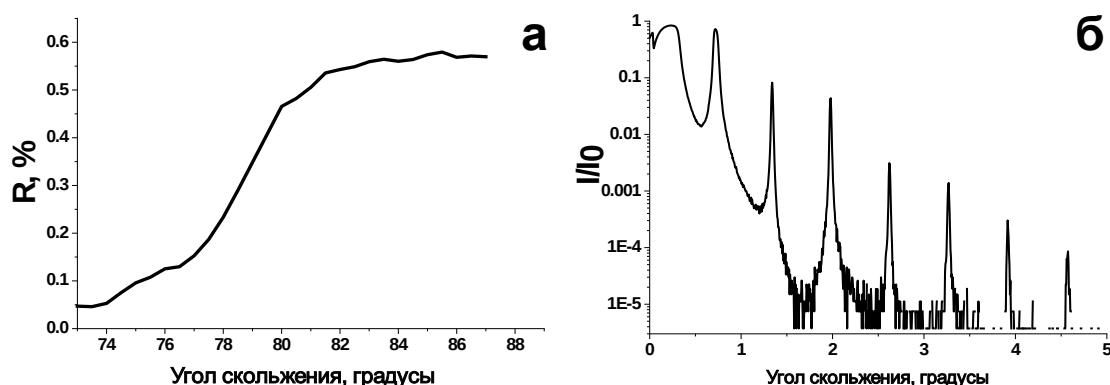


Рисунок 3.5 – Пример измерения МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$ с 20% азота в среде рабочего газа на рабочей длине волны 13.5 нм (а) и на длине волны 0.154 нм (б).

Зеркала, изготовленные в среде аргон+азот обладают хорошей периодичностью – наблюдаются высокие порядки брэгговской дифракции и значительные коэффициенты отражения.

В таблице 3.1 приведены результаты измерения отражательной способности на рабочей длине волны 13.5 нм, значения внутренних напряжений и удельного электросопротивления МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$ изготовленных при разных содержаниях азота в среде рабочего газа.

Таблица 3.1 - Данные значения коэффициента отражения, напряжения и удельного электросопротивления МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$.

$\text{N}_2, \%$	$R, \%$	$s, \text{МПа}$	$\rho, \text{Ом} \cdot 100\text{нм}$
0	66.5	-450	43.9
13	59.7	-730	85.8
20	57.9	-700	97.3
30	55.3	-670	103.6
40	47.3	-733	101.7
50	45.5	-750	80.4

При добавлении азота в среду рабочего газа происходит резкое изменение физических характеристик: значение напряжения и удельного электросопротивления изменяются практически в 2 раза от исходных значений. И, если значения электросопротивления изменяются в нужную нам сторону – увеличиваются, то значения напряжений по модулю изменяются в худшую – напряжения растут. Тем не менее, несмотря на то, что значение электросопротивления возросло более чем в 2 раза от исходных значений, такие значения все еще слишком малы. При дальнейшем увеличении содержания азота в среде рабочего газа происходят незначительные изменения физических характеристик – слабое изменение напряжений и удельного электросопротивления. При этом при увеличении содержания азота в среде рабочего газа происходит постоянное уменьшение отражательной способности, которое мы связываем с дополнительным поглощением излучения азотом. При самом большом значении удельного электросопротивления на уровне $\sim 100 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$ значение напряжений находятся на уровне $\sim -700 \text{ МПа}$ (сжимающие напряжения), а значение коэффициента отражения составляет $\sim 50 - 55 \%$.

Для определения такой слабой зависимости физических характеристик многослойной системы от процентного содержания азота в среде рабочего газа были исследованы пленки Mo и Si , изготовленные при разном содержании азота в среде рабочего газа. Толщины пленок составляли $\sim 30 \text{ нм}$. Данные физических характеристик пленок MoN_x и SiN_y приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 - Физические характеристики пленок MoN_x и SiN_y при различном содержании азота в среде рабочего газа.

Материал	N_2 , %	s , МПа	ρ , Ом·100нм
MoN_x	0	-350	5.2
	20	-340	27.9
	50	-2850	37.2
SiN_y	0	-900	>500
	50	-1600	>500

Значение удельного электросопротивления пленки MoN_x при увеличении доли азота в среде рабочего газа значительно увеличиваются: в ~ 7 раз от исходного состояния при 50% содержании азота в среде рабочего газа. При этом сильно возрастает значение напряжений. Следует отметить, что Мо при больших значениях толщины обладает сжимающими напряжениями, а при малых значениях толщины – растягивающими [50-52]. В случае МРЗ Мо/Si, толщина слоя Мо является «малой» и пленка имеет растягивающие напряжения. Таким образом, точно судить о том, какая зависимость напряжения будет в «тонкой» пленке по зависимости от напряжения в «толстой» пленки не корректно. Значения электросопротивления пленки Si и в исходном состоянии, и изготовленной в среде рабочего газа «аргон+азот» очень высоки. Однако, при добавлении азота в среду рабочего газа происходит существенное увеличение сжимающих напряжений почти в 2 раза. Si, в свою очередь, в отличие от Мо при всех возможных толщинах слоев обладает сжимающими напряжениями.

Таким образом, можно сделать вывод, что основной вклад в увеличение сжимающих напряжений вносит Si слой. А существенного увеличения удельного электросопротивления, как в «толстой» пленке MoN_x , достичь в многослойной системе не удалось из-за малой толщины слоя MoN_x в МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$.

Таким образом, МРЗ $\text{MoN}_x/\text{SiN}_y$ не удовлетворяет двум условиям из трех: не имеет околонулевых значений внутренних напряжений и достаточного значения электросопротивления.

В работе так же были изучены системы на основе нитридов Zr, Nb и Y, однако их поведение фактически повторило результаты с нитридизацией молибдена.

3.2.1.2 Mo/Si с O₂

В качестве второго варианта активного газа был изучен кислород. Точно известно, что Mo с кислородом могут образовывать несколько химических соединений – Mo₂O₃, MoO₂, Mo₂O₅, Mo₄O₁₁ и MoO₃. Все они за счет кислорода обладают высоким уровнем электросопротивления. Однако, при работе с кислородом возникают определенные сложности, т.к. кислород достаточно активный и взрывоопасный газ. При работе с кислородом были соблюдены все требования по безопасности.

Для определения физических характеристик Mo слоя в зависимости от содержания кислорода в рабочем газе были изготовлены пленки MoO_x с разным содержанием кислорода в смеси рабочего газа. Данные физических характеристик приведены в таблице 3.3. Толщины пленок составляли ~30 нм. Ток разряда 600 мА.

Таблица 3.3 - Физические характеристики пленок MoO_x при различных содержаниях кислорода в среде рабочего газа.

O ₂ , %	s, МПа	ρ, Ом·100нм
0	-340	5
10	-340	27.3
20	-500	27.5
30	-600	28.7

При добавлении кислорода в среду рабочего газа при содержании в 10%, у пленки MoO_x происходит резкое увеличение электросопротивление в ~5.5 раза. При дальнейшем увеличении содержания кислорода в среде рабочего газа, существенного изменения в значении удельного электросопротивления пленки MoO_x нет. При этом происходит увеличение значения напряжений. Как уже

говорилося раніше, точно судити об зміні напружень в «тонкій» плівці Мо по змінам в «толстой» плівці Мо не зовсім коректно. Стоїть відзначити, що сильного змінення в щільності плівки Мо при додаванні кисню в середу робочого газу не сталося. Відсутність змінення в щільності плівки вказує на слабе вплив кисню на структуру самої плівки. Очевидно, що це відбувається через високу швидкість росту плівки, коли тільки незначительна частина молекул Мо встигає хімічно взаємодіяти з киснем. Було прийнято рішення понизити швидкість розпилення Мо шляхом зниження робочого струму магнетрона. В таблиці 3.4 наведені дані фізичних характеристик плівки MoO_x при різних значеннях задаваного струму розряду. Вміст кисню в середу робочого газу був однаковим і становив 20%.

Таблиця 3.4 - Фізичні характеристики плівок MoO_x при різних значеннях подаваного струму в середу робочого газу.

Струм, мА	ρ , г/см ³	s, МПа	ρ , Ом·100нм
600	10.03	-500	27.5
400	9.28	-230	33.6
270	8.07	-480	81
225	7.68	-500	129.3
200	6.24	-680	452.4
180	4.98	-300	>500

Зменшення швидкості розпилення (росту плівки Мо) призводить до сильного змінення фізичних характеристик, особливо електричного опору. Зменшення щільності плівки пов'язано з великим хімічним взаємодією молекул Мо з киснем і утворенням оксидних фаз в ростущій плівці. Більш наочно ця залежність представлена на малюнку 3.6. Лініями вказані табличні значення щільностей декількох оксидів Мо.

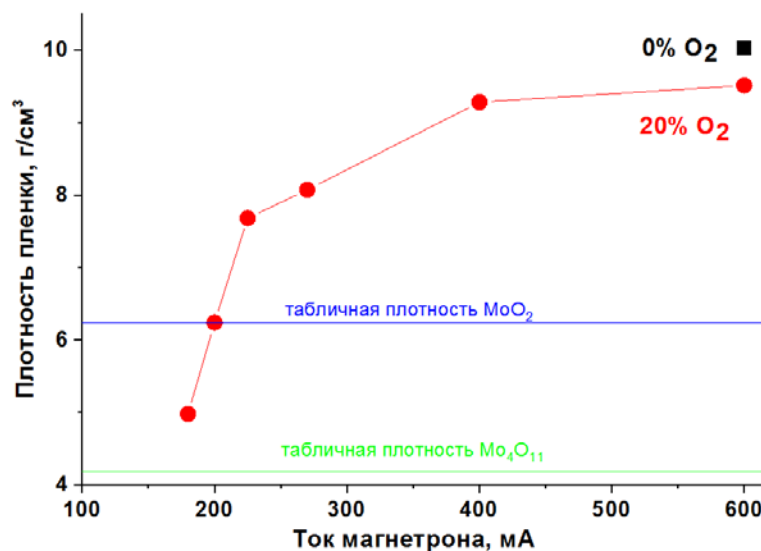


Рисунок 3.6 - Зависимость изменения плотности пленки MoO_x от значения тока на магнетроне при фиксированном содержании кислорода в среде рабочего газа 20%. Линиями указаны табличные значения нескольких плотностей оксидов Мо.

При уменьшении скорости роста пленки Мо (значения тока на магнетроне) происходит падение плотности пленки в сторону плотностей оксидов Мо. При этом, также происходит сильное увеличение удельного электросопротивления пленки. При значении тока на магнетроне 200 мА, плотность пленки соответствует плотности оксида молибдена MoO_3 . При дальнейшем уменьшении тока плотность уменьшается в сторону более кислородосодержащих оксидов молибдена. При этом, несмотря на более высокое значение электросопротивления, при значении тока 180 мА, для изготовления МРЗ Мо/Si было выбрано рабочее значения тока на магнетроне в 200 мА, а не меньше. Это значение тока было выбрано, т.к. значение электросопротивления пленки составило $452 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$, которое, уже находится на достаточном уровне для сохранения работоспособности МЭМС ($\rho \sim 500 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$). При этом дальнейшее уменьшение тока приведет к образованию более кислородосодержащих оксидов молибдена, что не позволит получить достаточный уровень отражательной способности на рабочей длине

волны, из-за того, что кислород на длине волны 13.5 нм сильно поглощает падающее излучение.

Была изготовлена и исследована серия МРЗ $\text{MoO}_x/\text{SiO}_y$, в которой и слой Мо и слой Si осаждались в среде аргон+кислород. Содержание кислорода составляло 20%. На рисунке 3.7 приведен пример результатов измерения МРЗ $\text{MoO}_x/\text{SiO}_y$ на рабочей длине волны 13.5 нм и на длине волны 0.154 нм.

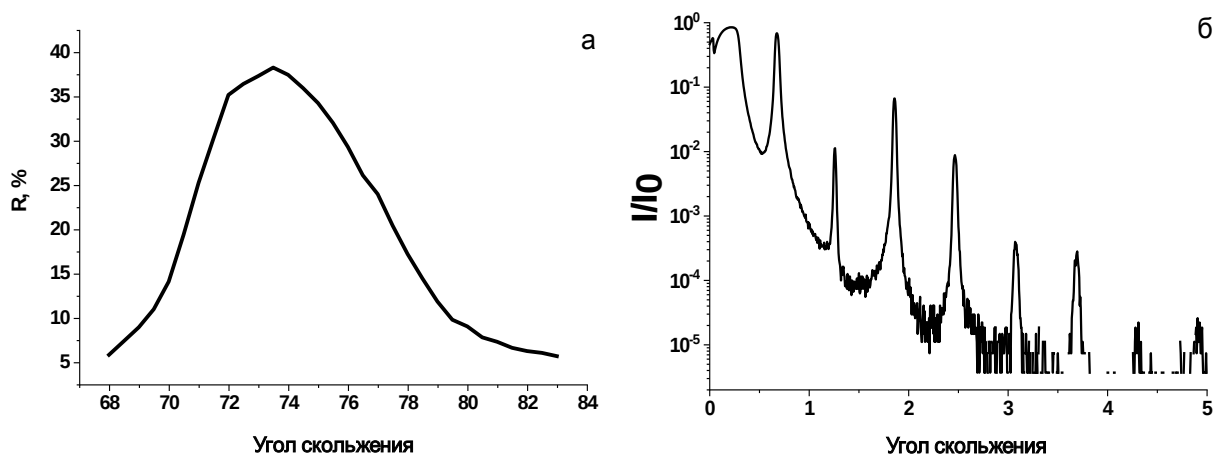


Рисунок 3.7 – Пример результатов измерений МРЗ $\text{MoO}_x/\text{SiO}_y$ на рабочей длине волны 13.5 нм (а) и на длине волны 0.154 нм (б).

В результате было установлено, что коэффициент отражения на рабочей длине волны находится на уровне 34-38%, значение сжимающих напряжений на уровне – 190 /– 210 МПа и значение удельного электросопротивления на уровне 135 – 186 Ом·100нм в зависимости от соотношения толщин слоев. Столь малое значение отражения связано с тем, что в процессе изготовления окисляется не только слой Мо, но и слой Si. Слой кремния окисляется несмотря на то, что мишень Si распыляется при большем значении тока разряда, чем в Мо – $I(\text{Si})=600$ мА. В дальнейшем было решено проводить осаждение в среде рабочего газа аргон+кислород не обоих материалов сразу (и Si и Мо), а только слоя Мо, т.к. значение электросопротивления «чистого» слоя Si удовлетворяет требованиям, а из-за окисления слоя Si, наблюдается уменьшение отражательной способности структуры. Для достижения этой задачи необходимо, чтобы при осаждении слоя Si на подложку, в рабочем газе не было

кислорода. А при осаждении слоя Мо, рабочий газ состоял из смеси аргона и кислорода. Это задача была решена путем попеременного включения/выключения подачи кислорода в рабочий объем в зависимости от того, какой именно материал на подложку осаждается в данный момент. Таким образом, слои МРЗ осаждались в разных рабочих газах и при разном значении давления: Si слой осаждался в среде рабочего газа аргона при давлении $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ торр, а Мо слой в среде рабочего газа аргон+кислород, при давлении $\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ торр – содержание кислорода $\sim 20\%$.

В таблице 3.5 приведены коэффициенты отражения и физические характеристики системы MoO_x/Si в зависимости от соотношения толщин слоев. Перечисление указано в хронологическом порядке.

Таблица 3.5 - Коэффициенты отражения и физические характеристики системы MoO_x/Si в зависимости от соотношения толщин слоев. Перечисление указано в хронологическом порядке.

$t(\text{MoO}_x)/d$	R, %	s, МПа	ρ , Ом·100нм
0.2	28.3	-540	>500
0.36	Не измерялись	-400	>500
0.42	27	-300	>500
0.5	20	-220	>500
0.275	18.5	-500	>500
0.5	10.8	-300	>500

Как видно из данных таблицы 3.5, электросопротивление МРЗ MoO_x/Si находится на очень высоком уровне все зависимости от соотношения толщин слоев и составляет больше 500 Ом·100нм. При этом минимальное значение внутренних напряжений находится на уровне ~ -200 МПа. Исходно, значение отражательной способности находится на уровне $\sim 30\%$, что уже ниже, чем у системы $\text{MoO}_x/\text{SiO}_2$. А при дальнейшем изготовлении идентичной структуры, ее отражение падает в 2 раза. Это можно наглядно увидеть при просмотре таблицы – соотношение толщин слоев в 1-м столбце указано в хронологическом порядке.

Такая зависимость отражательной способности связана с «загрязнением» распыляемой мишени Si кислородом, а также запылением камеры напылительной установки SiO_2 . В результате запыления стенок камеры диэлектриком – SiO_2 возникает скапливание заряда с последующим возникновением электрических разрядов – молний. Резкое ухудшение оптических характеристик в результате загрязнения мишени Si происходит за ~ 10 напылительных процессов. А полное загрязнение камеры с последующим возникновением молний за ~ 20 напылительных процессов. Такое малое количество технологических операций является недостаточным для осуществления полного технологического процесса.

Значение напряжений на уровне ~ -200 МПа возможно свести к нулевым или около нулевым значениям путем внесения дополнительных методов управления технологическим процессом, таким как повышение значения рабочего давления. Однако, свести к нулю процесс окисления мишени Si и запыления стенок рабочей камеры диэлектриком, что приводит к существенному ухудшению отражательных характеристик системы, не представлялось возможным в рамках данной работы. В этой связи, МРЗ Mo/Si, изготовленное в среде рабочего газа аргон+кислород не удовлетворяет двум условиям из трех: не имеет нулевого значения внутренних напряжений и высокого значения отражательной способности.

3.2.2 Изучение МРЗ Si/C и Si/B₄C

После неудачного поиска решений повысить значение электросопротивления металлов до высокого уровня, было принято решение исследовать отражающую систему, состоящую из материалов с изначально большим значением электросопротивления ($\rho \sim 500 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$ или больше). В качестве основного материала в таких структурах по-прежнему оставался Si, а в качестве второго материала были выбраны и изучены материалы – C и B₄C. Следует отметить, что в таком случае происходит «жертвование» коэффициентом отражения ради достижения одного из условий – изначально

большого значения электросопротивления системы. Таким образом, задачи из соблюдения одновременно трех условий превращается в задачу из соблюдения двух условий – околонулевого значения внутренних механических напряжений и максимально возможного значения отражающей способности на рабочей длине волны.

3.2.2.1 Рост Si/C и Si/B₄C при повышенном значении давления рабочего газа аргона

Один из возможных методов понижения уровня внутренних напряжений – повышение значения рабочего давления в камере напылительной установки. Понижение напряжений может произойти за счет уменьшения свободной энергии летящего атома. Понижение свободной энергии, в свою очередь, произойдет за счет много большего количества столкновений летящего атома от мишени к подложке с атомами рабочего газа.

Для исследования были изготовлены МРЗ Si/C и Si/B₄C с разным соотношением толщин слоев при «стандартном» давлении рабочего газа аргона $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ торр.

В таблице 3.6 представлены коэффициенты отражения и механические напряжения в МРЗ B₄C/Si в зависимости от соотношения толщин слоев.

Таблица 3.6 - Зависимость коэффициента отражения и напряжения в МРЗ B₄C/Si от доли слоя B₄C в периоде структуры.

t(B ₄ C)/d	R, %	s, МПа
0.69	Не измерялись	-1900
0.56	33	-1600
0.5	41	-1500
0.4	38.3	-1320

По данным результатам были определены оптимальные параметры многослойной системы. МРЗ B₄C/Si имеет коэффициент отражения на уровне $\sim 41\%$ и значение напряжений ~ -1500 МПа при соотношении толщины слоя

B_4C к периоду ~ 0.5 . Для дальнейших работ по уменьшению значения внутренних напряжений в данной системе было выбрано именно это значение соотношения толщин слоев. В таблице 3.7 приведена зависимость коэффициента отражения и значения внутренних напряжений в МРЗ B_4C/Si от давления рабочего газа, выраженного через «стандартное» давление $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ торр, принятого за единицу.

Таблица 3.7 - Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения в МРЗ B_4C/Si .

Давление аргона $X \cdot 1 \cdot 10^{-3}$ торр	R, %	s, МПа
1	38.3	-1320
3	34	-1150
5	13.11	-470
10	<3	-60
12	В пределах ошибки измерений	-50

Повышение значения рабочего давления приводит к уменьшению значения внутренних напряжений в МРЗ, однако, при этом происходит сильное уменьшение отражательной способности. Такое уменьшение коэффициента отражения происходит за счет сильного увеличения уровня шероховатости межслоевых границ вследствие понижения плотности пленок и увеличения уровня дефектов. Важным является тот факт, что данная система не обладает нулевым значением внутренних напряжений даже при 12-ти кратном увеличении значения давления рабочего газа.

В этой связи, система B_4C/Si не удовлетворяет двум условиям из двух: не имеет нулевое значение внутренних напряжений и высокий уровень отражательной способности на рабочей длине волны.

В таблице 3.8 представлены коэффициенты отражения и механические напряжения в МРЗ C/Si в зависимости от соотношения толщины слоя C к периоду.

Таблица 3.8 - Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения МРЗ Si/C от доли слоя C в периоде.

t(C)/d	R, %	s, МПа
0.29	23	Не измерялись
0.36	29	Не измерялись
0.4	32.5	-900
0.44	21.5	Не измерялись

По этим результатам были определены оптимальные параметры многослойной системы. МРЗ C/Si имеет коэффициент отражения на уровне $\sim 32.5\%$ и значение напряжений ~ -900 МПа при соотношении толщины слоя C к периоду ~ 0.4 . Для дальнейших работ по уменьшению значения внутренних напряжений в МРЗ было выбрано именно это значение соотношения толщин слоев. В таблице 3.9 приведена зависимость коэффициента отражения и значения внутренних напряжений в МРЗ C/Si от давления рабочего газа, выраженного через «стандартное» давление $1 \cdot 10^{-3}$ торр, принятого за единицу.

Таблица 3.9 - Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения в МРЗ C/Si.

Давление аргона $X \cdot 10^{-3}$ торр	R, %	s, МПа
1	35	-900
5	10	-230
10	В пределах ошибки измерений	-170

Повышение значения рабочего давления, как и в системе B_4C/Si , приводит к уменьшению значения внутренних напряжений в системе и сильному уменьшению отражательной способности. Важным является тот факт, что данная система также не обладает нулевым значением внутренних напряжений даже при 10-ти кратном увеличении давления рабочего газа. А такое сильное увеличение давления рабочего газа снижает уровень отражательной способности до около нулевых значений.

В этой связи, система C/Si также не удовлетворяет двум условиям из двух: не имеет нулевого значения внутренних напряжений и высокого уровня отражательной способности на рабочей длине волны.

3.2.2.2 Осаждение МРЗ C/Si на поверхность динамической маски

Несмотря на то, что ни МРЗ B_4C/Si , ни МРЗ C/Si не удовлетворяют одновременно всем условиям, было решено осадить МРЗ B_4C/Si на поверхность матрицы микрозеркал при давлении рабочего газа, повышенного в 10 раз от «стандартного» значения.

После осаждения МРЗ B_4C/Si на поверхность МЭМС микрозеркал, МЭМС не потеряла работоспособность. Это однозначно подтверждает, что основным механизмом выхода из строя МЭМС микрозеркал, после нанесения Mo/Be/Si отражающих покрытий, являлось электрическое замыкания управляющих контактов.

3.2.2.3 Исследование МРЗ Si/C и Si/ B_4C , осажденных в среде рабочего газа Ar + H_2

Еще один способ минимизации внутренних напряжений – использование водорода в качестве химически активного компонента в смеси с аргоном. Водород связывает оборванные связи на поверхности пленки, что может привести к компенсации дефектов структуры пленки и, соответственно, к уменьшению внутренних напряжений.

Для подтверждения этой гипотезы было изготовлено МРЗ C/Si в среде $Ar+H_2$ с 5% содержанием водорода. Значение внутренних напряжений в такой структуре составило ~ -660 МПа, что действительно оказалось меньше, чем в «чистом» МРЗ C/Si, ~ -900 МПа (таблица 3.8).

Для исследования влияния водорода в смеси с аргоном, на физические характеристики пленок, были исследованы тонкие пленки рабочих материалов – Si, B_4C и C при разных значениях рабочего тока. Толщины пленок составляли ~ 30 нм. Содержание водорода в среде рабочего газа составляло дополнительно

10% от 100% содержания аргона, т.е. значение давления рабочего газа аргона в камере, без добавления водорода, составляло $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ торр, а при добавлении 10% водорода, общее значение давления рабочего газа составляло $\sim 1,1 \cdot 10^{-3}$ торр.

В таблице 3.10 приведены физические характеристики тонких пленок рабочих материалов в зависимости от параметров изготовления.

Таблица 3.10 - Физические характеристики тонких пленок рабочих материалов в зависимости от параметров изготовления.

Материал	Ток, мА	σ , МПа	ρ , отн. ед.
Si без H ₂	600	-1300	1
Si с 10% H ₂	600	-1100	1.14
Si с 10% H ₂	300	-1050	1.09
C без H ₂	800	-1150	0.97
C с 10% H ₂	800	-600	0.86
C с 10% H ₂	400	-610	0.83
B ₄ C без H ₂	900	-2360	0.95
B ₄ C с 10% H ₂	900	-460	0.75

Таким образом, влияние добавления 10% водорода в рабочий газ при изготовлении на исследуемые материалы можно охарактеризовать следующим образом:

- на значения напряжений пленки Si, водород оказывает слабое влияние – значение внутренних напряжений уменьшается всего на ~ 200 МПа, даже при более низком значении подаваемого тока на материал мишени при изготовлении. При этом, после добавления водорода произошло увеличение плотности пленки Si, а не ее уменьшение, что выглядело крайне нетипично. Проведенный литературный поиск показал, что уплотненную фазу кремния, которую мы обнаружили в ходе экспериментов, наблюдали в [83], также полученную в среде рабочего газа аргон+водород. Авторы работы объясняют такой эффект получением аморфного Si с плотностью выше, чем плотность кристалла Si.

- на значение внутренних напряжений в пленке C, водород оказал существенное влияние. Значение напряжений уменьшилось практически в 2 раза, с ~ -1150 МПа до ~ -600 МПа. При этом, при добавлении водорода, произошло сильное падение плотности пленки – на $\sim 10\%$ от исходного значения. При уменьшении подаваемого тока дальнейшие изменения незначительны;

- на значение внутренних напряжений в пленке B_4C , водород оказал наибольшее влияние. Значение внутренних напряжений уменьшилось более чем в 5 раз: с ~ -2360 МПа до ~ -460 МПа. При этом произошло сильное падение плотности пленки на 20% от исходного значения.

Самое большое влияние на физические характеристики добавление водорода в среду рабочего газа оказало на материал B_4C . В этой связи, вначале более детально было изучено МРЗ B_4C/Si . Значения рабочих токов при изготовлении, как МРЗ B_4C/Si , так и МРЗ C/Si было решено оставить «стандартным», т.к. сильного влияние на физические свойства пленок понижение тока не оказало. При этом содержание водорода в среде рабочего газа было принято значительно увеличить, т.к. его малое содержание не вносит нужных изменений в физические характеристики. Соотношение толщин слоев материалов для исследования МРЗ B_4C/Si было выбрано 1:1, т.к. такое соотношение в данной системе обеспечивает максимальное значение отражательной способности. В таблице 3.11 приведены значения коэффициента отражения и напряжений в МРЗ B_4C/Si в зависимости от содержания водорода в среде рабочего газа. Процентное содержание водорода указано относительно содержания аргона в среде рабочего газа.

Таблица 3.11 - Зависимость коэффициента отражения и напряжений в МРЗ B_4C/Si от содержания H_2 в среде рабочего газа.

% H_2	R, %	s, МПа
0	41	-1500
75	8.1	-240
100	8.2	-60

Как видно из таблицы 3.11, добавление водорода привело к значительному уменьшению уровня внутренних напряжений. При этом значение коэффициента отражения составляет $\sim 8\%$. Возможно, при дальнейшем добавлении водорода в среду рабочего газа, было бы возможным полностью избавиться от внутренних напряжений, однако, после изготовления МРЗ, на поверхности системы были обнаружены микрократеры с вырванным веществом (так называемый блистеринг). И чем большее содержание водорода в среде рабочего газа, тем больше размер микрократеров на поверхности. В этой связи, данная система не удовлетворяет основным условиям поставленной задачи.

В таблице 3.12 приведены значения коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм и значения внутренних механических напряжений в МРЗ C/Si в зависимости от содержания водорода в среде рабочего газа и соотношения толщины слоя C в МРЗ C/Si к периоду. В данной структуре было принято решение изменять соотношение толщин слоев в сторону увеличения толщины слоя C, т.к. влияние добавления водорода на значение напряжений в C было не такое значительное, как в V_4C . Процентное содержание водорода указано относительно содержания аргона в среде рабочего газа.

Таблица 3.12 - Зависимость коэффициента отражения и механических напряжений в МРЗ C/Si от парциального давления H_2 и доли C в периоде МРЗ.

% H_2	$t(C)/d$	R, %	s, МПа
0	0.4	32.5	-900
75	0.5	13	-60
75	0.57	12.5	-35
75	0.64	11	-7
87	0.64	10	-4
100	0.64	11.6	+10
120	0.64	10	+7
150	0.64	6,47	+20

Увеличение доли углерода в периоде многослойного зеркала, при сохранении одинакового количества водорода в среде рабочего газа в 75%,

приводит к уменьшению значения внутренних напряжений и выходу к около нулевым значениям. При отношении толщины углерода к периоду $t(C)/d = 0.64$ и 75% содержании водорода в среде рабочего газа, значение напряжений составляет ~ -7 МПа, что уже удовлетворяет критерию $|s| \leq 10$ МПа. При этом значение коэффициента отражения находится на уровне $R \sim 11\%$. При дополнительном добавлении водорода в среду рабочего газа до соотношения водород : аргон = 1 : 1.2 (120% H_2), значение напряжений переходят из сжимающего состояния в растягивающее и сохраняются в пределах критерия. При этом, значение отражательной способности также находится на уровне $R \sim 11\%$. Переход от растягивающих напряжений к сжимающим однозначно указывает на то, что существует нулевое значение напряжений. При дальнейшем увеличении водорода в среде рабочего газа до уровня 150% происходит рост растягивающих напряжений и уменьшение коэффициента отражения.

Также, в этой системе отсутствует блистеринг, характерный для системы B_4C/Si . Таким образом, МРЗ C/Si , осажденная в среде рабочего газа «аргон+водород» при содержании водорода в среде рабочего газа на уровне между 75% и 120% от давления аргона, соответствует всем поставленным требованиям: имеет высокое значение электросопротивления, нулевые значения внутренних механических напряжений и приемлемый для безмасочной литографии коэффициент отражения $R \sim 11\%$ на рабочей длине волны 13.5 нм (в ~ 6.4 раза ниже, чем максимально возможный $R = 70.15\%$ [46]).

3.3 Основные результаты по главе 3

Основные результаты, полученные в главе 3 диссертационной работы можно охарактеризовать следующим образом.

1. Для МРЗ $Mo/Be/Si$ найдены толщины пленок, обеспечивающие одновременно высокие коэффициенты отражения, $R \sim 66-67\%$ на длине волны 13.5 нм и околонулевые механические внутренние напряжения. Система выглядит перспективной для изготовления МРЗ для проекционных систем

литографов, микроскопов и телескопов, обеспечивающих дифракционное качество изображений.

2. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики систем Mo(Zr, Nb, Y)/Si, изготовленных методом магнетронного распыления в смеси аргона и химически активного газа азота и системы Mo/Si, изготовленной в смеси аргона и химически активного газа кислорода. Одновременно добиться и околонулевого значения внутренних напряжений и высокого уровня электросопротивления и коэффициента отражения в системе с металлами не удалось.

3. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики МРЗ C/Si и B₄C/Si, изготовленных при разных значениях рабочего давления аргона. Увеличение рабочего давления приводит к уменьшению плотности материала, уменьшению уровня внутренних напряжений и увеличению шероховатости межслоевых границ, что снижает коэффициент отражения на длине волны 13.5 нм почти до нуля, при околонулевых значениях напряжений.

4. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики МРЗ C/Si и B₄C/Si, изготовленных при добавлении водорода в среду рабочего газа. Установлено, что в МРЗ B₄C/Si, из-за добавления водорода, на поверхности образуются микрократеры (блистеринг), которые не позволяют использовать данную систему в качестве отражающей оптики.

5. Добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 при синтезе МРЗ C/Si, приводит к уменьшению внутренних напряжений к околонулевым значениям. Также отсутствует явление блистеринга. Таким образом, найдена бесстрессовая и диэлектрическая система C/Si, обеспечивающая на длине волны 13.5 нм коэффициент отражения $R=11\%$, что представляет интерес для безмасочной рентгеновской литографии. Меньший, по сравнению с теорией (до 40%) коэффициент отражения обусловлен относительно низкой плотностью рассеивающего слоя C (~ 0.8 от табличного значения) и, наоборот, повышенной плотностью слоев Si, а также большой межслоевой шероховатостью ($\sigma \sim 2$ нм).

По результатам главы 3 опубликованы следующие работы: [A6, A7, A9, A10, A11, A14, A16, A17, A18], [T3, T4, T6, T8, T9, T12, T17].

Глава 4. Нанесение и исследование MP3 C/Si на МЭМС

В качестве МЭМС микрозеркал была выбрана МЭМС микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600 DMD фирмы Texas Instruments. Данная МЭМС была выбрана из следующих соображений:

- она предназначена для работы в качестве пространственно-временного модулятора света с минимальным размером пикселя;
- она является передовой МЭМС в мире и используется, в том числе в составе ультрафиолетовых безмасочных литографах;
- коммерчески доступна.

В данной главе изучены основные характеристики этой МЭМС, которые принципиально важны для ее использования в рентгеновском литографе и которые не описаны в документации, а также возможность создания на ее основе динамической маски для рентгеновской литографии.

На поверхность матрицы микрозеркал осаждено отражающее покрытие C/Si . Установлены и выполнены требования для получения отражения излучения с длиной волны 13.5 нм от поверхности динамической маски. Успешно пройдены испытания по облучению матрицы микрозеркал рентгеновским излучением в окрестности длины волны 13.5 нм, не приведшие к ее выходу из рабочего состояния.

4.1 Характеристики коммерчески доступной матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600

С точки зрения применения в рентгеновской литографии, МЭМС микрозеркало марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600 представляет собой электронно-управляемую версию бинарной маски, изменяемую с высокой, до 10 кГц, частотой (рис. 4.1).

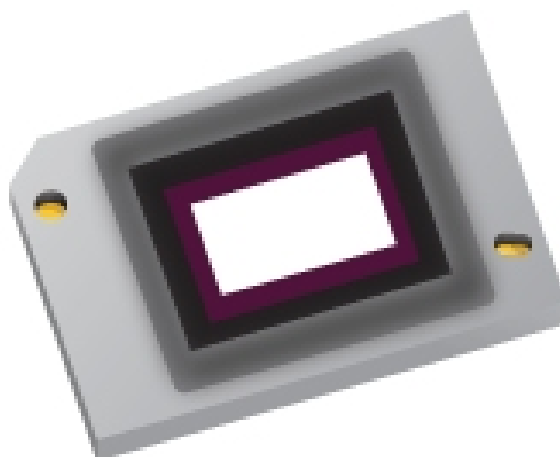


Рисунок 4.1 - Внешний вид матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600. Рисунок взят из [25].

Данный чип микрозеркал применяется во многих задачах, в частности для УФ-литографии. Под защитным стеклом, которое прозрачно для рабочего диапазона длин волн больше 360 нм, находится площадка, размером 1×1.5 см, состоящая из множества микрозеркал (2048×1200 штук), размером 7.65×7.65 мкм, толщиной порядка несколько сотен нанометров. Для исследования поверхности микрозеркал МЭМС и последующего осаждения на ее поверхность отражающего, на длине волны 13,5 нм, покрытия необходимо было удалить защитное стекло. Удаление данного защитного стекла оказалось довольно сложной задачей, тем не менее, в рамках диссертационной работы она была решена.

Поворот микрозеркала происходит по диагонали на ± 12 градусов от ровного состояния за счет подачи электрического сигнала на контакты (рис. 4.2).

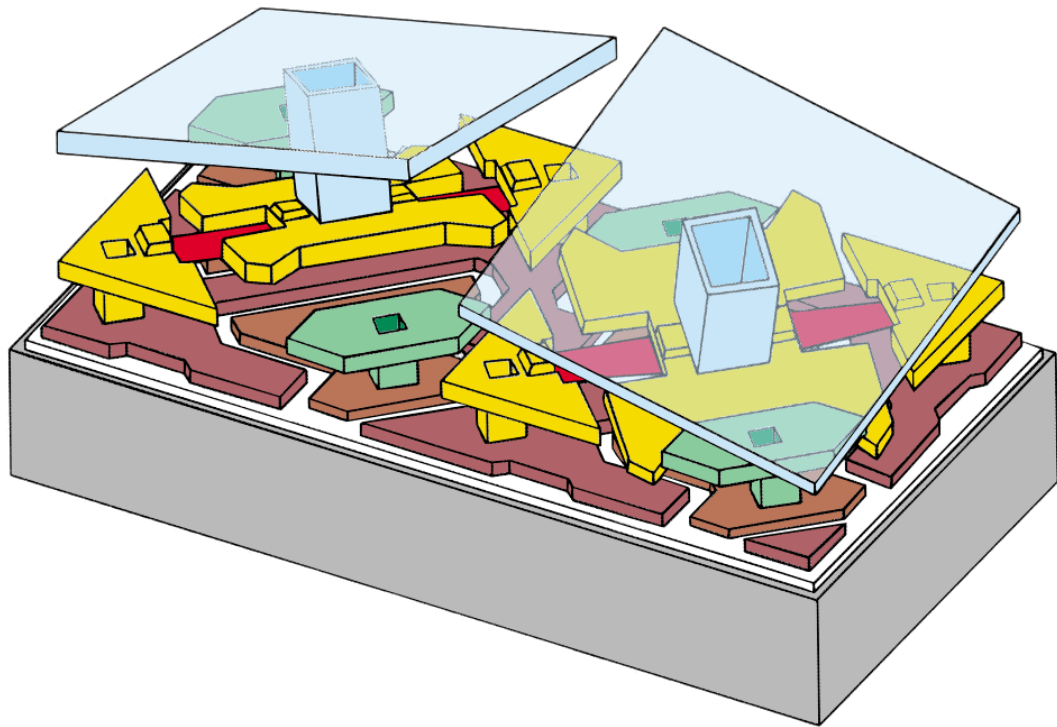


Рисунок 4.2 - Схема поворота микрозеркала матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600. Рисунок взят из [84].

Рисунок формируется за счет поворота каждого микрозеркала в отдельности в ту или иную сторону или остановки в изначальном положении. Подробнее описание МЭМС можно найти в [25].

Требования к качеству поверхности микрозеркал для применения в рентгеновской литографии в десятки раз превышает таковые для УФ-литографии, в которой данный чип микрозеркал полностью выполняет требования по работоспособности.

После удаления защитного стекла были изучены шероховатость и форма поверхности микрозеркал. Исследования формы поверхности проводились на интерферометре белого света ZYGO, объектив 100х. Данные измерений приведены на рисунках 4.3 и 4.4.

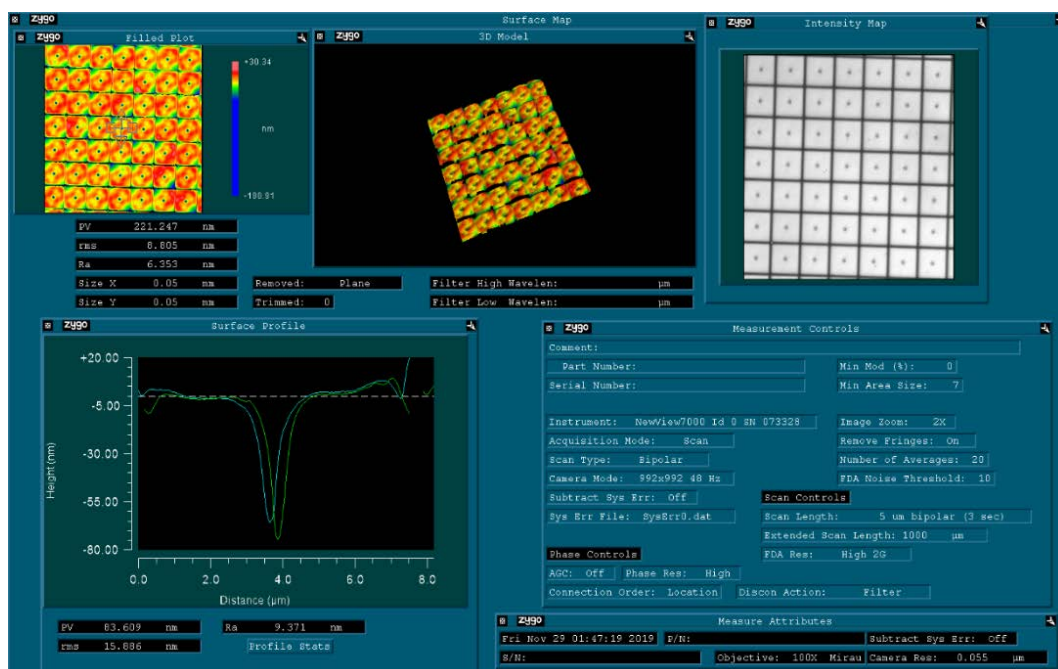


Рисунок 4.3 - Данные измерений матрицы микрозеркал на интерференционном микроскопе Zygo, объектив 100х, поперечные срезы.

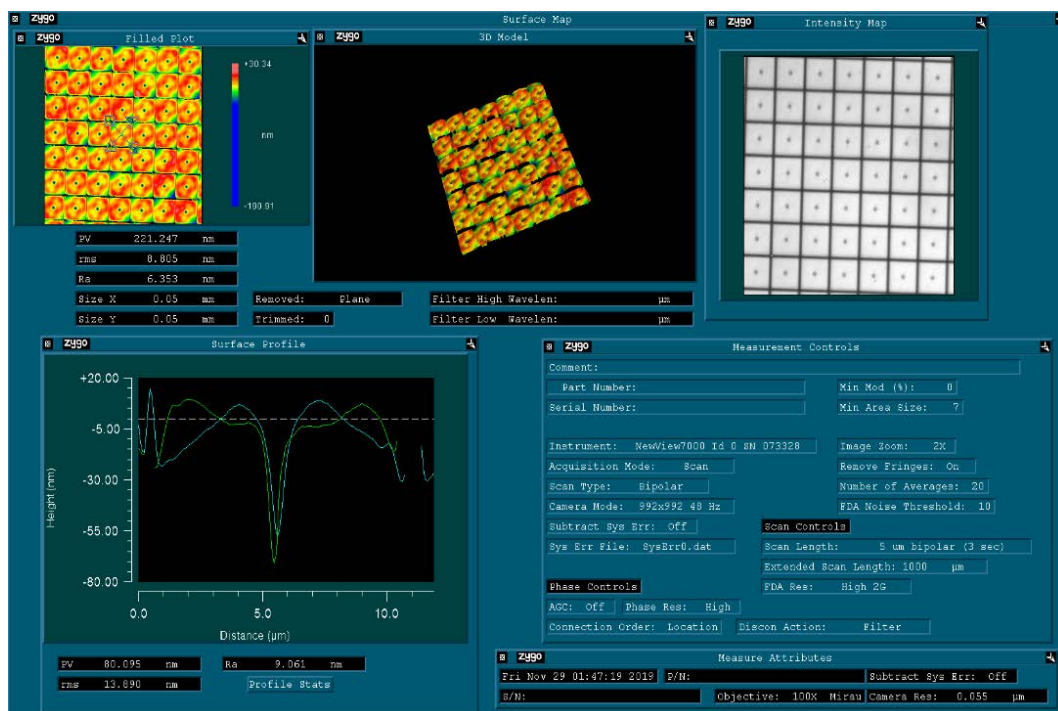


Рисунок 4.4 - Данные измерений матрицы микрозеркал на интерференционном микроскопе Zygo, объектив 100х, диагональные срезы.

Микрозеркала в МЭМС DLP6500 изначально характеризуются заметной неплоскостностью. Во-первых, в центре каждого микрозеркала имеется заметный провал, объясняющийся особенностями конструкции крепления

микрозеркала на одну ножку. Наглядно это показано на АСМ снимке поверхности 9-ти микрозеркал (рис. 4.5). Поскольку зеркала вращаются вдоль диагонали, форму зеркал имеет смысл характеризовать по отношению к направлению поворота. Согласно приведенным данным, в направлении наклона микрозеркал, характерные значения прогиба составляют по параметру PV (peak-to-valley) $\sim 10 - 15$ нм. Вдоль диагонали, вокруг которой происходит разворот микрозеркал, они искривлены до ~ 15 нм по параметру PV. Значение СКО от плоскости исходных микрозеркал порядка 6 - 7 нм.

С помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima (NT-MDT) осуществляется контроль шероховатости и формы поверхности микрозеркал. Вначале снимается кадр 20×20 мкм² (рис. 4.5). При восстановлении профиля поверхности вычитается поверхность первого порядка (наклон столика), отклонения от плоскостности высоких порядков (второго, третьего) не вычитаются и считаются реальной формой поверхности. На рисунке 4.5 можно видеть углубление в центре каждого «лепестка», связанное с особенностями крепления.

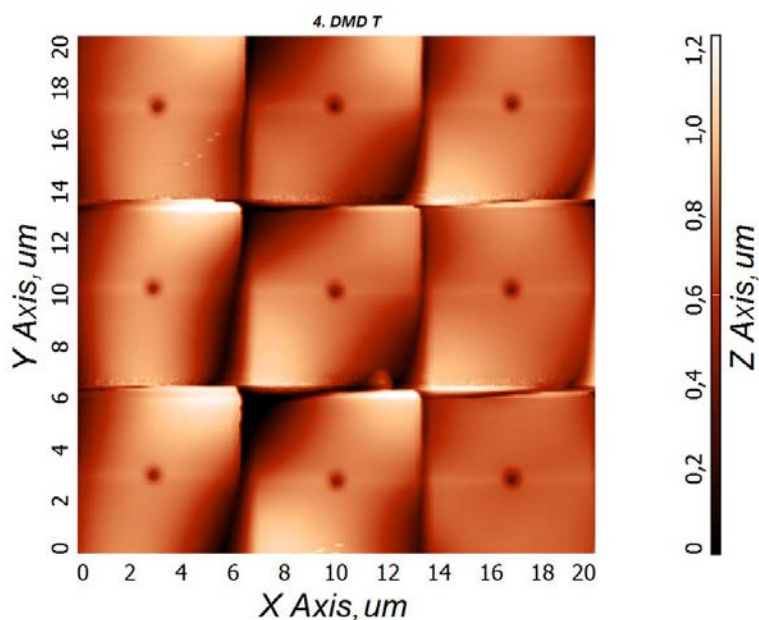


Рисунок 4.5 – АСМ кадр 20×20 мкм поверхности матрицы микрозеркал.

Полученные данные позволяют сделать заключение об общем качестве поверхности, ее загрязненности, а также об искривлении поверхности.

После снятия карты поверхности 20×20 мкм² на полученном кадре выбирается позиция для снятия кадра 3×3 мкм² и 1×1 мкм², несущего информацию о высокочастотной шероховатости, непосредственно влияющей на коэффициент отражения наносимого многослойного покрытия. Область сканирования выбирается таким образом, чтобы в нее не попадал ни край, ни центр (крепеж) микрозеркала. Исходная шероховатость поверхности микрозеркал составила: $\sigma_{3 \times 3} = 2.4$ нм, $\sigma_{1 \times 1} = 1.9$ нм. АСМ кадры исходной поверхности микрозеркала представлены на рисунке 4.6.

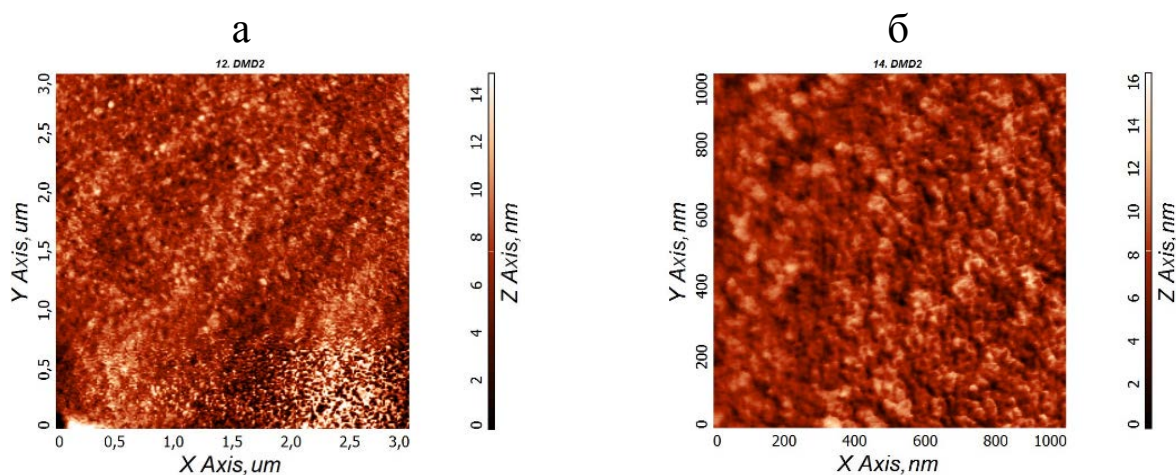


Рисунок 4.6 - АСМ кадры поверхности микрозеркала: а) кадр 3×3 мкм²;
б) кадр 1×1 мкм².

Такой большой уровень шероховатости ($\sigma \sim 2$ нм) может привести к значительным ухудшениям отражательной характеристики отражающего покрытия за счет наследования шероховатости покрытием от поверхности.

4.2 Исследование работоспособности и коэффициента отражения МЭМС микрозеркал после съема защитного стекла и нанесения отражающего покрытия

После съема защитного стекла, была обнаружена деградация работоспособности МЭМС, проявляющаяся в том, что микрозеркала переставали управляться. На поверхности МЭМС появлялась «застывшая» картинка. На рисунке 4.7. приведены фотографии МЭМС микрозеркал, которая

сразу после съема защитного стекла помещалась в вакуум, а исследование поверхности в микроскопе производилось по истечению 3-х дней. На рисунке слева видно, что в начале эксперимента дефекты на МЭМС не наблюдаются. Через 3 дня появляется светлая «галка», а еще через 3 дня практически все микрозеркала перестали управляться, а на поверхности сформировалась «застывшая» картина. Причем пиксели «застыли» в самых разных положениях, и в среднем (нулевом), и повернутые вправо, и влево.



Фото МОЭМС
после вскрытия

В середине
эксперимента

В конце эксперимента

Рисунок 4.7 – Фотографии МЭМС со снятым защитным стеклом, снятые в вакууме.

Аналогичное исследование было проведено на МЭМС, покрытой МРЗ C/Si, изготовленного в среде рабочего газа $\text{Ar}+\text{H}_2$. Процедура подготовки к исследованиям была аналогична той, что описаны выше. Сразу после съема защитного стекла, МЭМС помещалась в вакуум, в напылительную установку. После напыления отражающего покрытия, в установку напускался сухой азот; МЭМС помещалась в среду азота в герметичный объем и переносилась к рефлектометру. После вскрытия герметичного объема, МЭМС сразу устанавливалась в рефлектометре и откачивалась до высокого вакуума. Тем самым контакт с атмосферой был минимален.

На рисунке 4.8 приведены три последовательно снятые кривые отражения на длине волны $\lambda = 13.5$ нм, а также усредненная кривая (а) и спектральная

зависимость коэффициента отражения (б) от наилучшего МЭМС C/Si, обеспечивающего минимальное искажение формы микрозеркал.

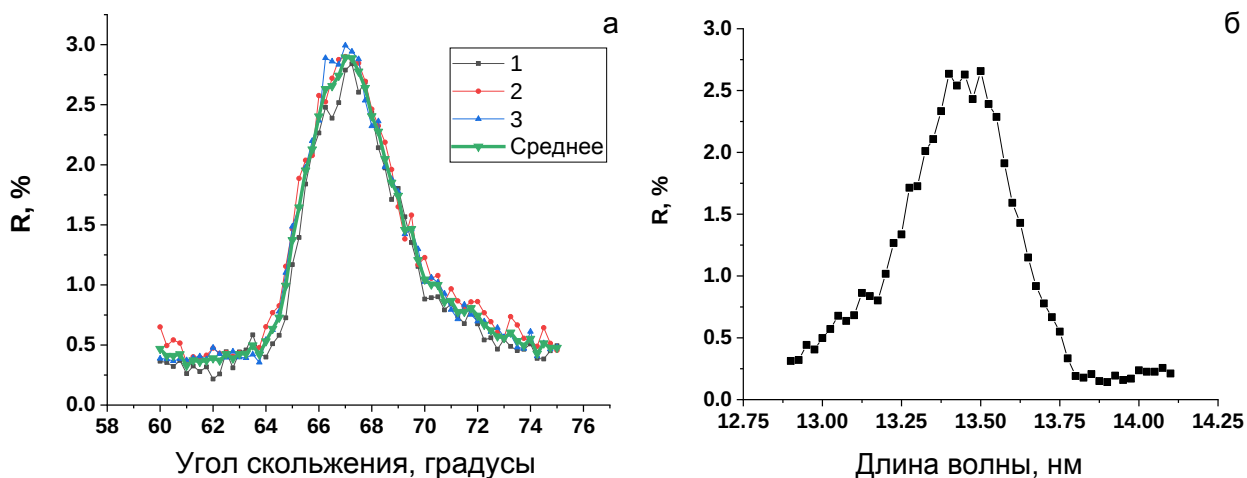


Рисунок 4.8 – Три последовательных измерения кривой отражения на длине волны 13.5 нм и средняя по трем измерениям (а) и спектральная зависимость коэффициента отражения (б) от МЭМС с МРЗ C/Si на поверхности микрозеркал.

Пиковый коэффициент отражения по трем измерениям на рабочей длине волны 13.5 нм составил $R = 2.8\%$ при угле скольжения 67° . Следует отметить, что при уменьшении значения периода структуры, т.е. смещению в большие значения рабочего угла, из-за поляризационных эффектов должно произойти увеличение отражательной способности. Этот эксперимент не был сделан из-за ограниченного числа дорогостоящих МЭМС микрозеркал.

На рисунке 4.9 приведена угловая зависимость коэффициента отражения от МЭМС, снятая в широком диапазоне углов детектора при фиксированном, около 70° , скользющем угле падения излучения на МЭМС после «заморозки» микрозеркал МЭМС. Как видно из рисунка, часть пикселей находится в нулевом положении, часть повернута на максимальный угол 12° влево, часть – вправо. В момент измерений питание на МЭМС микрозеркал не подавалось.

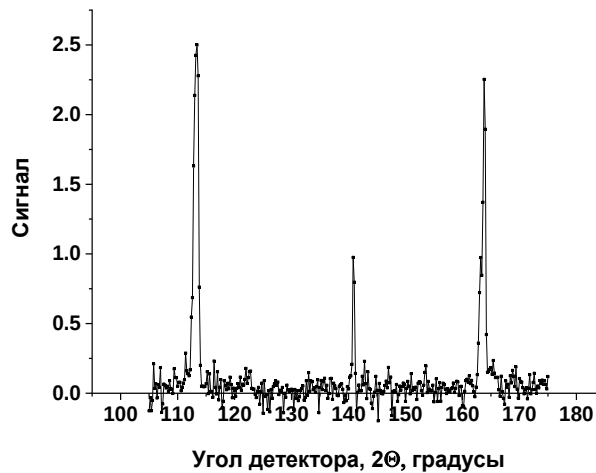


Рисунок 4.9 – угловые зависимости коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм, измеренные с интервалом через 3 дня.

Следует отметить, что в начале эксперимента пики отражения соответствовали поданному напряжению. При нулевом напряжении наблюдался только пик в 70° , при подаче напряжения, в зависимости от подачи напряжения на левый или правый электроды, максимумы отраженной интенсивности наблюдались слева или справа.

Для стабилизации работоспособности МЭМС во времени была изучена возможность применения ALD покрытия (atomic layer deposition), сразу после вскрытия МЭМС. Совместно с ФТИ им. К.А. Валиева была разработана соответствующая методика и найдена оптимальная толщина покрытия Al_2O_3 , которая составила около 2 нм и при которой, с одной стороны деградация полностью прекращалась, а с другой – возросшая упругость торсионной ножки еще позволяла отклонять микрозеркало.

Недостатком метода является то, что угол поворота уменьшился с 12° , до $\sim 0,3^\circ$. К сожалению, как показано на рис. 4.10, для МЭМС выбранного типа, исходно микрозеркала имеют угловой разброс относительно среднего, примерно на таком же уровне.

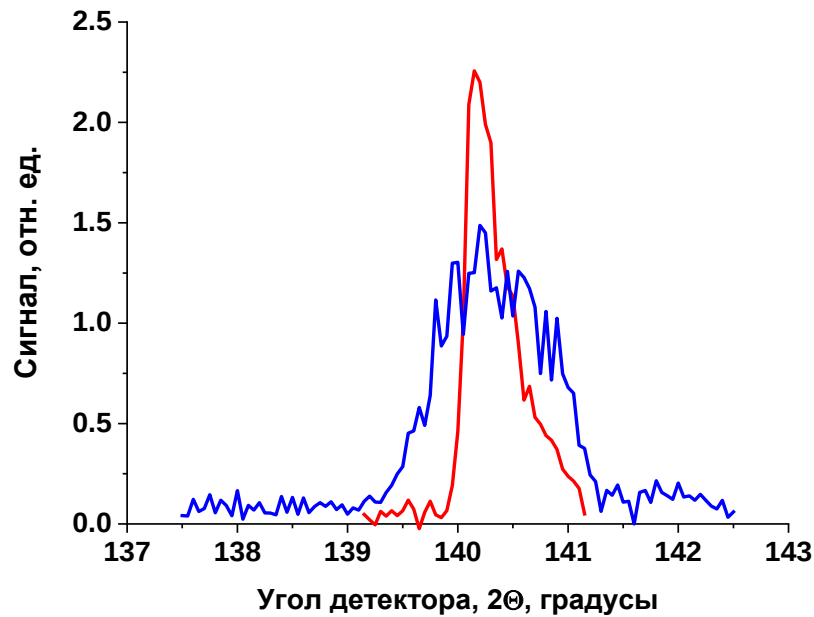


Рисунок 4.10 – Индикатрисы зондового (красная кривая в центре) и отраженного от МЭМС (внешняя синяя кривая) пучков.

Такой угловой разброс указывает на то, что реальная отражательная способность на рабочей длине волны от МЭМС микрозеркал должна быть выше. При сохранении значения интеграла под кривой отражения, но уменьшении полуширины до значения полуширины зондового пучка, истинное пиковое значение коэффициента отражения будет выше в ~ 2.63 раза, т.е. составлять $R \sim 7.4\%$, а не $R = 2.8\%$. Интегральное значение отражательной способности (4.1) составляет $R = 7.1\%$.

$$R_{\text{инт}} = \frac{\int R(2\theta) d(2\theta)}{\int I(2\theta) d(2\theta)} \quad (4.1)$$

В этой связи, дальнейшее развитие работ по МЭМС для управления пространственно-угловыми характеристиками рентгеновских пучков должно идти в направлении уменьшения исходного углового разброса микрозеркал.

Тем не менее, впервые с помощью подачи электрических сигналов была продемонстрирована возможность управления пространственными характеристиками отраженного рентгеновского пучка от МЭМС, тем самым

продемонстрирована принципиальная возможность создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии.

4.3 Испытание МЭМС микрозеркал интенсивным пучком излучения с длиной волны 13.5 нм

Важной характеристикой МЭМС для безмасочной рентгеновской литографии является ее радиационная стойкость. В диссертационной работе исследовалась МЭМС с нанесенным ALD покрытием и МРЗ C/Si. Облучение испытуемого образца, излучением с длиной волны в окрестности 13.5 нм проводилось на стенде спектральных измерений на основе лазерно-плазменного источника в диапазоне длин волн 5 – 50 нм – стенд рефлектометра на базе монохроматора Черни-Тернера и лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения [57, 59]. Модифицированная для этих целей схема приведена на рисунке 4.11.

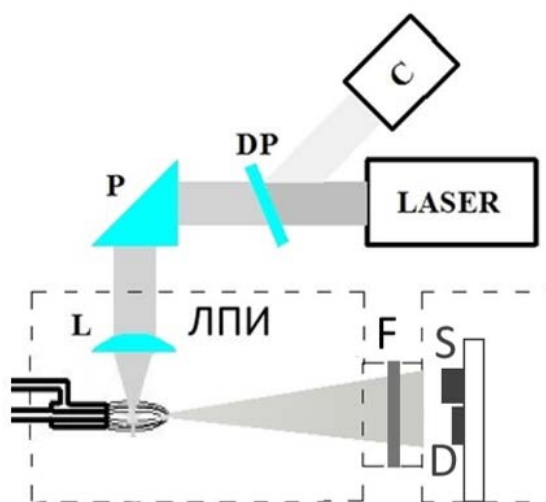


Рисунок 4.11 - Схема модифицированного стенда для изучения радиационной стойкости МЭМС с отражающими покрытием.

Стенд включает в себя следующие элементы: Laser - Nd:YAG-лазер, длина волны 1064 нм, DP – делитель пучка, С – калориметр (датчик мощности), Р – призма, с помощью которой излучение лазера перенаправляется в вакуумную камеру, L – короткофокусная линза для фокусировки лазерного излучения на

мишень. Лазерно-плазменный источник состоит из импульсного, работающего синхронно с частотой лазера, газового клапана. Газовый клапан установлен на двухкоординатном столе, обеспечивающем его позиционирование в двух плоскостях непосредственно в вакууме. Для выделения из спектра излучения источника длины волны в окрестности 13.5 нм, перед исследуемым образцом МЭМС микрозеркал устанавливаются два идентичных $Zr/ZrSi_2$ фильтра, выделяющие спектральную область 12.4 - 15 нм [85, 86]. Для минимизации повреждения тонкопленочных фильтров при вакуумной откачке и выгрузке тестируемого образца, установлена система медленной откачки с регулируемым клапаном. Все описанные элементы смонтированы на стенде через соответствующие вакуумные фланцы.

Воздействие рентгеновского излучения с длинами волн в окрестности 13.5 нм на исследуемый образец МЭМС осуществлялось в течение 40 часов за пять рабочих интервалов. Показания детектора D заносились в лабораторный журнал каждые 15 минут (время усреднения сигнала 5 секунд). Контроль средней мощности рентгеновского излучения источника можно видеть на рисунке 4.12. В данном случае средний сигнал составил 4.5 В по показаниям вольтметра, что с учетом чувствительности детектора 0.215 [А/Вт] и коэффициента преобразования усилителя соответствует $4.5 \cdot 10^{-5} [A] / 0.215 [A/Вт] = 0.21$ мВт выходной мощности источника.

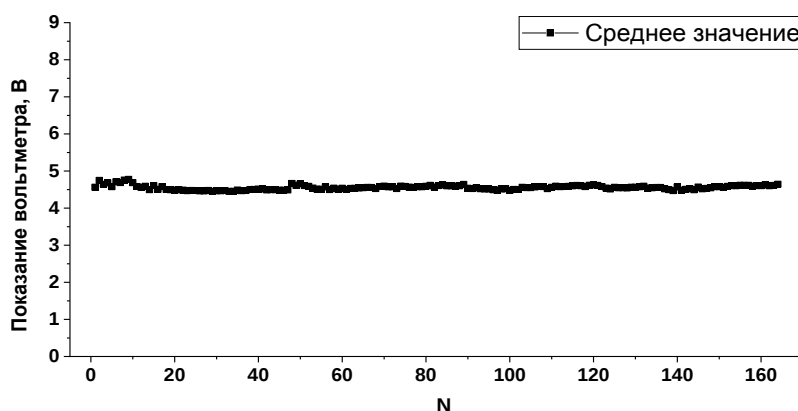


Рисунок 4.12 – Зависимость сигнала от числа отсчетов (каждый отсчет – 15 мин).

После облучения и извлечения МЭМС микрозеркал, ее работоспособность была проверена. Для этих целей видеокамера записывала меняющееся по заданной программе изображение на МЭМС микрозеркал. Фрагмент видео работающей МЭМС приведен на рисунке 4.13. В целом МЭМС сохраняет свою работоспособность в течение нескольких месяцев наблюдения, что указывает на эффективность пассивации микросхемы ALD покрытием.



Рисунок 4.13 – Фрагмент видео, демонстрирующее работоспособность МЭМС с ALD пассивирующим покрытием и МРЗ C/Si, отражающим 13,5 нм после облучения в течение 40 часов излучением с длиной волны в окрестности 13.5 нм и плотностью мощности 0.21 Вт/см².

4.3 Основные результаты по главе 4

Четвертая глава посвящена изучению возможности создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии на базе коммерчески доступных МЭМС микрозеркал, предназначенных для использования в видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Изучались характеристики поверхности микрозеркал, коэффициенты отражения и рассеяния рентгеновского излучения МЭМС с C/Si отражающим покрытием, а также долговременная стабильность и радиационная стойкость по отношению к облучению излучением, с длинами волн в окрестности 13.5 нм, и с

интенсивностью, характерной для работы в безмасочном литографе. В ходе исследований были получены следующие важнейшие результаты:

1. Впервые была продемонстрирована возможность создания пространственно-временного модулятора рентгеновского излучения с помощью коммерчески доступной МЭМС микрозеркал. После нанесения бесстрессового и диэлектрического C/Si покрытия на МЭМС микрозеркал экспериментально был получен пиковый коэффициент отражения $R=2.8\%$ и интегральный $R=7.1\%$ на $\lambda=13.5$ нм.

2. Изучены характеристики коммерчески доступной МЭМС микрозеркал марки DLP6500 фирмы Texas Instruments. Эффективная шероховатость поверхности микрозеркал в диапазоне пространственных частот $0.05 - 63 \text{ мкм}^{-1}$ составила $\sigma_{\text{eff}}=2$ нм, а среднеквадратическое отклонение поверхности от плоскости на уровне СКО $\sim 6-7$ нм. После снятия защитного стекла, МЭМС микрозеркал в течение нескольких часов экспонирования в атмосфере теряли работоспособность. Нанесение ALD покрытия с толщиной, порядка 2 нм, сразу после вскрытия чипа, увеличило время жизни чипа. Наблюдение в течение полугода не обнаружило потерю работоспособности МЭМС.

3. Показано, что облучение МЭМС микрозеркал с отражающим C/Si покрытием в течение 40 часов излучением с длиной волны в окрестности 13.5 нм и с плотностью рентгеновской мощности 0.21 мВт/см^2 , характерной для работы в составе безмасочного рентгеновского литографа не влияет на работоспособность МЭМС.

По результатам главы 4 опубликованы следующие работы: [A13, A17], [T8, T10, T13, T14].

Заключение

Данная работа посвящена разработке, синтезу и изучению свойств МРЗ для проекционной рентгеновской литографии на длине волны в окрестности 11.2 нм и для проекционной рентгеновской безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм.

В рамках диссертационной работы получены следующие важнейшие результаты:

1. Изучены микроструктура и ее изменение в результате изотермического вакуумного отжига рентгеновских зеркал Мо/Ве. Установлено, что на границе Мо-на-Ве образуется соединение с малым содержанием бериллия – MoBe_2 . На границе Ве-на-Мо образуется соединение с большим содержанием бериллия – MoBe_{12} или MoBe_{22} . Установлено, что в результате изотермического вакуумного отжига в течении 1 часа изменения внутренней микроструктуры МРЗ нет, а за счет перераспределения кислорода внутри многослойной системы происходит рост коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм на 6%, относительно исходного значения. При более длительном времени отжига происходит падение коэффициента отражения за счет изменения внутренней микроструктуры – увеличения ширин переходных границ, изменение состава переходных границ и увеличение верхнего окисленного слоя.

2. Изучены микроструктура и отражательные характеристики в окрестности длины волны 11 нм МРЗ Ru/Ве. Коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм составил $R=66\%$ при $\Delta\lambda=0.33$ нм. Коэффициент отражения ограничен сильным перемешиваем материалов системы между собой и большим значением ширин переходных границ: $s(\text{Ru-на-Ве})\sim 1$ нм, $s(\text{Ве-на-Ru})\sim 0.4$ нм.

3. Изучены микроструктура и отражательные характеристики в окрестности длины волны 11 нм МРЗ Ru/Ве с буферными слоями Мо на границах раздела. Коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм составил

рекордные $R=72.2\%$ при $\Delta\lambda=0.38$ нм. Причиной улучшения оптических характеристик является меньшее перемешивание слоев системы между собой и уменьшение ширины переходной границы Ru-на-Be с 1 нм до 0.8 нм, что приводит к увеличению оптического контраста на границе раздела. Показано, что данное МРЗ обладает временной стабильностью рентгенооптических характеристик как минимум в течении 2-х лет после изготовления и обладает околонулевым уровнем внутренних механических напряжений. Сравнение оптической эффективности в составе двенадцати зеркальной оптической системы литографа указывает на преимущество в 36% Ru/Be МРЗ на длине волны 11.2 нм перед Mo/Si МРЗ на длине волны 13.5 нм

4. Изучены рентгенооптические и физические характеристики в МРЗ Mo/Be/Si. Найдены значения толщин пленок, обеспечивающие одновременно высокие коэффициенты отражения $R\sim 66-67\%$ на длине волны 13.5 нм и околонулевые механические внутренние напряжения. Система выглядит перспективной для изготовления МРЗ для проекционных систем литографов, микроскопов и телескопов, обеспечивающих дифракционное качество изображений.

5. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики МРЗ C/Si и B_4C/Si , изготовленных в широком диапазоне давлений рабочего газа аргона и в смеси «аргон+водород». Показано, что увеличение рабочего давления приводит к уменьшению плотности материалов, уменьшению уровня внутренних механических напряжений и увеличению шероховатости межслоевых границ, что снизило коэффициент отражения на длине волны 13.5 нм почти до нуля, при околонулевых значениях механических напряжений. При добавлении в среду рабочего газа водорода у пленок Si происходит увеличение плотности выше табличного значения. Плотность C и B_4C пленок, наоборот, уменьшается. В системе B_4C/Si , из-за добавления водорода, в пленках B_4C наблюдается явление блистеринга. Данный эффект не позволяет использовать эту систему в качестве отражающей оптики. Добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 при синтезе МРЗ C/Si приводит к уменьшению

внутренних напряжений до околонулевых значений. Таким образом, найдена бесстрессовая и диэлектрическая система C/Si, обеспечивающая на длине волны 13.5 нм коэффициент отражения $R \sim 11\%$. Меньший, по сравнению с теорией (до 40%) коэффициент отражения обусловлен относительно низкой плотностью рассеивающего слоя C (~ 0.8 от табличного значения) и, наоборот, повышенной плотностью слоев Si, а также большой межслоевой шероховатостью ($\sigma \sim 2$ нм).

6. Получен экспериментальный образец МЭМС микрозеркал, отражающей рентгеновское излучение на длине волны 13.5 нм. Изучены ее работоспособность и стойкость к облучению излучением с длиной волны в окрестности 13.5 нм и с плотностью мощности 0.21 мВт/см^2 , моделирующей условия реального безмасочного литографа. Подтверждена реализуемость создания динамической маски на основе МЭМС микрозеркал для безмасочной рентгеновской литографии.

Список литературы

1. Сайт компании «ASML», [Electronic resource]. - URL: <https://www.asml.com/en/search?query=twinscannxe>
2. Pirati, A. The future of EUV lithography: enabling Moore's law in the next Decade / Alberto Pirati, Jan van Schoot, Kars Troost, [et al.] // Proc. of SPIE. – 2017. – V.10143. – P.101430G.
3. Салащенко, Н. Н. Коротковолновая проекционная литография / Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало // Вестник Российской Академии Наук – 2008. – Т.78. – №. 5. – С.13.
4. 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 [et. al.] // Applied Physics Letters. – 2013. – V.102. – №. 1 – P. 011602.
5. Kuznetsov, D. S. High-reflectance La/B-based multilayer mirror for 6.x nm wavelength / D. S. Kuznetsov, A. E. Yakshin, J. M. Sturm, [et. al.] // Opt. Lett. – 2015. – V.40. – №.16. – P.3776.
6. Churilov, S. S. EUV spectra of Gd and Tb ions excited in laser-produced and vacuum spark plasmas / Churilov, S. S., Kildiyarova, R. R., Ryabtsev, A. N., Sadovsky, S. V. // Physica Scripta. – 2009. – V.80 – P.045303
7. Chkhalo, N. I. Next generation nanolithography based on Ru/Be and Rh/Sr multilayer optics / N. I. Chkhalo, N. N. Salashchenko // AIP Advances. – 2013. – V.3. – №.8. – P.082130.
8. Сайт Ассоциации ЭКБ, [Electronic resource]. - URL: <http://elcompbase.ru/news/38/>
9. Servin, I. Process development of a maskless N40 via level for security application with multibeam lithography / Servin I., Pimenta-Barros P., Bernadac A. [at. al.] // Proc. of SPIE. – 2018. – V.10584. – P.198-208.

10. Choksi, N. Maskless extreme ultraviolet lithography / Choksi N., Pickard D. S., McCord M., [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1999. - V. 17. – P. 3047.
11. Chkhalo, N. Deposition of Mo/Si multilayers onto MEMS micromirrors and its utilization for extreme ultraviolet maskless lithography / Chkhalo, N., Polkovnikov, V., Salashchenko, N., Toropov, M. // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2017. – V. 35. – P. 062002.
12. Chkhalo, N. I. Problems and prospects of maskless (B)EUV lithography / Chkhalo N. I., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N. Toropov M. N. // Proc. of SPIE. – 2016. – V. 10224. – P. 102241O.
13. Chen, Y. The effects of wafer-scan induced image blur on CD control, image slope and process window in maskless lithography / Chen Y., Shroff Y. // Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6151. – P. 61512D.
14. Киреев В. Ю. Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография - процессы и оборудование // Учебно-справочное руководство. – Интеллект – 2016 – 328 с.
15. Ito, T. Pushing the limits of lithography / Ito T., Okazaki S. // Nature. – 2000. – Vol. 406. – P. 1027-1031.
16. Klein, C. PML2: the maskless multibeam solution for the 22 nm node and beyond / Klein C., Platzgummer E., Klikovits J., [et al.] // Proc. of SPIE – 2009. – V. 7271. – P. 72710N.
17. Watanabe, H. Mask cost and specification / Watanabe H., Higashikava I. // Proc. of SPIE. – 2003. – V. 5256. – P. 423-430.
18. Naulleau, P. Sub-70 nm extreme ultraviolet lithography at the advanced light source static microfield exposure station using the engineering test stand set-2 optic / Naulleau, P., Goldberg, K. A., Anderson, E. H., [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. – 2002. – V.20. – №.6. – P.2829-2833.
19. Dijsseldonk, A. Concept of ASML EUV Tool: Lithography Aspects / Dijsseldonk, A. // NanoCMOS (Pull-Nano) / More Moore Event «Beyond 45nm Technologies», Belgium, IMEC. – 2006. – P.9-10.

20. Wood, O. Insertion strategy for EUV lithography / Wood, O., Arnold, J., Brunner, T., [et al.] // Proc. of SPIE – 2012. – V. 8322. – P. 32-39.
21. Kim, S.-S. Progress in EUV lithography toward manufacturing / Kim, S.-S., Chalykh, R., Kim, H., [et al.] // Proc. of SPIE – 2017. – V. 10143. – P. 1014306.
22. Сайт компании «Samsung», [Electronic resource]. - URL: <https://news.samsung.com/global/samsung-announces-industrys-first-euv-dram-with-shipment-of-first-million-modules>
23. Сайт компании «TSMC», [Electronic resource]. - URL: https://www.tsmc.com/uploadfile/pr/newspdf/THHIIHIPGTH/NEWS_FILE_EN.pdf
24. Сайт компании «ASML», [Electronic resource]. - URL: <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscan-nxe3400b>
25. Сайт компании «Texas Instruments», [Electronic resource]. - URL: <https://www.ti.com/product/DLP6500FYE/part-details/DLP6500BFYE>
26. Montcalm, C. Multilayer reflective coatings for extreme-ultraviolet lithography / Montcalm, C., Bajt, S., Mirkarimi, P.B., Spiller E.A., [et al.] // Proc. of SPIE. – 1998. – V.3331. – P.42-51.
27. Skulina, K.M. Molybdenum/beryllium multilayer mirrors for normal incidence in the extreme ultraviolet / Skulina, K. M., Alford, C. S., Bionta, R. M., [et al.] // Applied Optics. – 1995. – V34. – №.19. – P.3727-3730.
28. Mirkarimi, P.B. Mo/Si and Mo/Be multilayer thin films on Zerodur substrates for extreme-ultraviolet lithography / Mirkarimi, P. B., Bajt, S., Wall, M. A.// Applied Optics. – 2000. – V. 39. – №.10 – P.1617-1625.
29. Singh, M. Design of multilayer extreme-ultraviolet mirrors for enhanced reflectivity / Singh, M. Braat, J.J.M. // Applied Optics. – 2000. – V. 39. – P.2189-2197.
30. Bajt, S. Experimental investigation of beryllium-based multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography / Bajt, S., Behymer, R. D., Mirkarimi, P. B., [et al.] // Proc. of SPIE. – 1999. – V.3767. – P.259-270.

31. Mirkarimi, P.B. Stress, reflectance, and temporal stability of sputter-deposited Mo/Si and Mo/Be multilayer films for extreme ultraviolet lithography / Mirkarimi, P.B. // *Optical Engineering*. – 1999. – V. 38. – №.7. – P.1246–1259.
32. Bajt, S. Molybdenum–ruthenium/beryllium multilayer coatings / Bajt, S. // *J. Vac. Sci. Technol. A*. – 2000. – V.18. – №.2. – P.557-559.
33. Вайнер, Ю.А. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Вайнер, Ю. А., Гарахин, С. А., Зуев, С. Ю., [и др.] // *УФН*. – 2020. – Т.190. – С 92-106.
34. Svechnikov, M.V. Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography / Svechnikov, M. V., Chkhalo, N. I., Gusev, S. A., [et. al.] // *Optics Express*. – 2018. – V.26. – №.26. – P.33718-33731.
35. Nechay, A. N. Study of oxidation processes in Mo/Be multilayers / Nechay, A. N., Chkhalo, N. I., Drozdov, M. N., [et. al.] // *AIP Advances*. – 2018. – V.8. – P.075202.
36. Slaughter, J.M. Interfaces in Mo/Si multilayers / Slaughter, J. M., Kearney, P. A., Schulze, D. W., [et. al.] // *Proc. of SPIE*. – 1991. – V.1343. – P.73-82.
37. Rosen, R.S. Silicide layer growth rates in Mo/Si multilayers / Rosen, R. S., Stearns, D. G., Viliardos, M. A., [et. al.] // *Applied Optics*. – 1993. – V.32. – №.34. – P.6975-6980.
38. Braun, S. Mo/Si Multilayers with Different Barrier Layers for Applications as Extreme Ultraviolet Mirrors / Braun, S., Mai, H., Moss, M., [et. al.] // *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*. – 2002. – V.41. – №.6. – P.4074–4081.
39. Sakhonenkov, S.S. Angle resolved photoelectron spectroscopy as applied to X-ray mirrors: an in depth study of Mo/Si multilayer systems / Sakhonenkov, S. S., Filatova, E. O., Gaisin, A. U., [et. al.] // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2019. – V.21. – P.25002-25010.

40. Barbee, T.W. Molybdenum-silicon multilayer mirrors for the extreme ultraviolet / T. W. Barbee, Jr., S. Mrowka, M. C. Hettrick // *Appl. Opt.* – 1985. – V.24. – №.6. – P.883-886.
41. Petford-Long, A.K. High-resolution electron microscopy study of x-ray multilayer structures / A. K. Petford-Long, M. B. Stearns, C. H. Chang, [et. al.] // *J. Appl. Phys.* – 1987. – V.61. – №.4. – P.1422-1428.
42. Slaughter, J.M. Structure and performance of Si/Mo multilayer mirrors for the extreme ultraviolet / J. M. Slaughter, D. W. Schulze, C. R. Hills, [et. al.] // *J. Appl. Phys.* – 1994. – V.76 – №.4. – P.2144-2156.
43. Stearns, D. G. Multilayer mirror technology for soft-x-ray projection lithography / D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon // *Appl. Opt.* – 1993. – V.32. – №.34. – P.6952-6960.
44. Andreev, S.S. The microstructure and X-ray reflectivity of Mo/Si multilayers / S. S. Andreev, S. V. Gaponova, S. A. Gusev, [et. al.] // *Thin Solid Films.* – 2002. – V.415. – P.123-132.
45. Kaiser, N. High-performance EUV multilayer optics / N. Kaiser, S. Yulin, M. Perske, T. Feigl // *Proc. of SPIE.* – 2008. – V.7101. – P.360-372.
46. 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. [et. al.] // *Proc. of SPIE.* – 2007. – V.6517. – P.158-166.
47. Born, M. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light / M. Born, E. Wolf // Elsevier. – 2013.
48. Hopcroft, M. A. What is the Young's Modulus of Silicon? / M. A. Hopcroft, W. D. Nix, T. W. Kenny // *J. Microelectromech. Syst.* – 2010. – V.19. – №.2. – P.229-238.
49. Chkhalo, N. I. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography / Chkhalo, N. I., Gusev, S. A., Nechay, A. N., [et. al.] // *Optics Letters.* – 2017. – V.42. – №.24. – P.5070-5073.

50. Thornton, J.A. Internal stresses in titanium, nickel, molybdenum, and tantalum films deposited by cylindrical magnetron sputtering / J. A. Thornton, D. W. Hoffman // J. Vac. Sci. Technol. – 1977. – V.14. – №.1. – P.164.
51. Thornton, J.A. Internal stresses in Cr, Mo, Ta, and Pt films deposited by sputtering from a planar magnetron source / J. A. Thornton, D. W. Hoffman // J. Vac. Sci. Technol. – 1982. – V.20. – №.3. – P.355.
52. Thornton, J.A. The influence of discharge current on the intrinsic stress in Mo films deposited using cylindrical and planar magnetron sputtering sources / J. A. Thornton, D.W. Hoffman // J. Vac. Sci. Technol. – 1985. – V.3. – №.3. – P.576.
53. Vink, T.J. Stress in sputtered Mo thin films: The effect of the discharge voltage / T. J. Vink, J. B. A. D. van Zon // J. Vac. Sci. Technol. – 1991. – V.9. – №.1. – P.124.
54. Windt, D.L. Variation in stress with background pressure in sputtered Mo/Si multilayer films / D. L. Windt, W. L. Brown, C. A. Volkert, W. K. Waskiewicz // J. Appl. Phys. – 1995. – V.78. – №.4. – P.2423-2430.
55. Montcalm, C. Reduction of residual stress in extreme ultraviolet Mo/Si multilayer mirrors with postdeposition thermal treatments / C. Montcalm // Opt. Eng. – 2001. – V.40. – №.3. – P.469-477.
56. Чхало Н. И. Многослойные Рентгеновские Зеркала. Диагностика и Применения // Изд. – LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – С.406. – ISBN: 978-3-8443-5651-9.
57. Гарахин, С. А. Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 5 – 50 нм: описание и результаты тестирования / С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, [и др.] // Квантовая электроника. – 2017. – Т.47. – №.4. – С.385-392.
58. Sokolov A. At-wavelength metrology facility for soft X-ray reflection optics / Sokolov, A., Bischoff, P., Eggenstein, F., [et. al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2016. – V.87. – P.052005.
59. 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, [et. al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2020. – V.91. – №.6. – P. 063103-1 – 063103-13

60. Svechnikov, M. Multifitting 2: software for reflectometric, off-specular and grazing-incidence small-angle scattering analysis of multilayer nanofilms / Svechnikov, M. // J. Appl. Crystallogr. – 2024. – V.57. – №.3. P.848-858.

61. Svechnikov M. Extended model for the reconstruction of periodic multilayers from extreme ultraviolet and X-ray reflectivity data / Svechnikov M., Pariev D., Nechay A., [et. al.] // J. Appl. Crystall. – 2017. – V.50. – №.5. – P.1428–1440.

62. Комплексный спектрометр Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi - РЦ «Физические методы исследования поверхности» [Electronic resource]. - URL: <https://surface.spbu.ru/ru/oborudovanie/2-uncategorised/4-kompleksnyj-spektrometr-thermo-scientific-escalab-250xi.html>

63. Синхротрон «КИСИ-Курчатов», станция НАНОФЭС [Electronic resource]. URL: <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/nanopes/index.shtml>

64. Fedoseenko, S.I. Commissioning results and performance of the high-resolution Russian–German Beamline at BESSY II / Fedoseenko, S. I., Vyalikh, D. V., Iossifov, I. E., [et. al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2003. – V. 505. – №.3. – P.718–728.

65. Kumar, N. Phase analysis of tungsten and phonon behavior of beryllium layers in W/Be periodic multilayers / N. Kumar, R.S. Pleshkov, A.V. Nezhdanov, [et. al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2021. – V.23. – P.23303–23312.

66. Ber, B. Sputter depth profiling of Mo/B₄C/Si and Mo/Si multilayer nanostructures: A round-robin characterization by different techniques / B. Ber, P. Bábor, P. N. Brunkov, [et. al.] // Thin Solid Films. – 2013. – V.540. – P.96–105.

67. Drozdov, M. N. Time-of-flight secondary ion mass spectrometry study on Be/Al-based multilayer interferential structures / M. N. Drozdov, Y. N. Drozdov, N. I. Chkhalo, [et. al.] // Thin Solid Films. – 2018. – V.661. – P.65–70.

68. Chkhalo, N. I. Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics / N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina // *Rev. Sci. Instrum.* – 2015. – V. 86. – P.016102.
69. Chernyshov, A.A. Structural Materials Science end-station at the Kurchatov Synchrotron Radiation Source: Recent instrumentation upgrades and experimental results / Chernyshov, A. A., Veligzhanin, A. A., Zubavichus, Y. V. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* – 2009. – V.603. – №.1-2. – P.95–98.
70. Синхротрон «КИСИ-Курчатов», станция СТМ [Electronic resource]. URL: <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/stm/index.shtml>
71. Ravel, B. ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT / Ravel, B., Newville, M. // *J. Synchr. Rad.* – 2005. V.12. – P.537-541.
72. Zabinsky, S.I. Multiple-scattering calculations of X-ray-absorption spectra / Zabinsky, S. I., Rehr, J. J., Ankudinov, A., [et. al.] // *Phys. Rev. B.* – 1995. – V.52. – №.4. – P.2995-3009.
73. Joly, Y. X-ray absorption near-edge structure calculations beyond the muffin-tin approximation / Joly, Y. // *Phys. Rev. B.* – 2001. – V.63. – №.12. – P.125120-125129.
74. Guda, S. A. Optimized finite difference method for the full-potential XANES simulations: Application to molecular adsorption geometries in MOFs and metal–ligand intersystem crossing transients / Guda, S. A., Guda, A. A., Soldatov, M. A., [et. al.] // *J. Chem. Theory Comp.* – 2015. – V.11. – №.9. – P.4512-4521.
75. Hedin, L. Explicit local exchange-correlation potentials / L. Hedin, B. I. Lundqvist // *Journal of Physics C.* – 1971. – V.4. – №.14. – P.2064.
76. Gates-Rector, S. The powder diffraction file: a quality materials characterization database / Gates-Rector, S., Blanton, T. // *Powder Diffr.* – 2019. – V.34. – №.4. – P.352–360.
77. Bunău, O. Self-consistent aspects of x-ray absorption calculations / Bunău, O., Joly, Y. // *J. Phys. Cond. Mat.* – 2009. – V.21. – №.34. – P.345501.

78. Добрынин, А. В. О применимости формулы Стони для расчета механических напряжений в толстых пленках и покрытиях / А. В. Добрынин // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т.23. – №.18. – С.32-36.
79. Андреев, С. С. Многослойные рентгеновские зеркала на основе La/B₄C и La/B₉C / Андреев, С. С., Барышева, М. М., Чхало, Н. И., [и др.] // ЖТФ. – 2010. – Т.80. – №.8. – С.93–100.
80. Svechnikov, M. Multifitting: software for the reflectometric reconstruction of multilayer nanofilms / M. Svechnikov. // J. Appl. Crystallogr. – 2020. – V.53. – P.244–252.
81. Benninghoven, A. Secondary ion mass spectrometry: basic concepts, instrumental aspects, applications and trends / A. Benninghoven, F. G. Rudenauer, H. W. Werner, // Surf. Interface Anal. – 1987. – V.10. – №.8. P.435.
82. Kozakov A. T. Size-dependent plasmon effects in periodic W-Si- based mirrors, investigated by X-ray photoelectron spectroscopy / A. T. Kozakov, N. Kumar, S. A. Garakhin, [et. al.] // Appl. Surf. Sci. – 2021. – V.566. – P.150616.
83. Eike Gericke, Jimmy Melskens, Robert Wendt, Markus Wollgarten, Armin Hoell, and Klaus Lips / Quantification of Nanoscale Density Fluctuations in Hydrogenated Amorphous Silicon / Physical Review Letters, 2020, 125, 185501
84. Сайт Электронного периодического издания «3DNews», [Electronic resource]. URL: <https://3dnews.ru/600716>
85. Chkhalo N.I. Free-standing spectral purity filters for extreme ultraviolet lithography / N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, L.A. Shmaenok, V.E. Banine, A.M. Yakunin // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. – 2012.-Vol. 11(2).- 021115
86. Chkhalo N.I. Freestanding multilayer films for application as phase retarders and spectral purity filters in the soft X-ray and EUV ranges / N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Gusev, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, N.N. Tsybin, B.A. Volodin // Proc. of SPIE. – 2011. – Vol. 8076. – 80760O-1

Список работ автора по теме диссертации

Публикации

A1. Смертин, Р. М. Влияние термического отжига на свойства многослойных зеркал Mo/Be / Р. М. Смертин, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, А. Н. Нечай, Н. В. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, М. G. Sertsu, A. Sokolov, Н. И. Чхало, F. Schöafers, П. А. Юнин / Журнал технической физики. – 2019. – Т.89. – В.11. – С 1783-1788.

A2. Барышева, М. М. Оптимизация состава, синтез и изучение широкополосных многослойных зеркал для ЭУФ диапазона / М. М. Барышева, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, Р. М. Смертин, Н. И. Чхало, E. Meltchakov / Журнал технической физики. – 2019. – Т.89. – В.11. – С. 1763-1769.

A3. Sergey, A. Study of Interfaces of Mo/Be Multilayer Mirrors Using X-ray Photoelectron Spectroscopy / S. A. Kasatkov, E. O. Filatova, S. S. Sakhonenkov, A. U. Gaisin, V. N. Polkovnikov, R. M. Smertin / J. Phys. Chem. C. – 2019. – V.123. – P.25747–25755.

A4. Вайнер, Ю. А. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Ю. А. Вайнер, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, А. Н. Нечай, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. В. Свечников, М. Г. Сертсу, Р. М. Смертин, А. Соколов, Н. И. Чхало, Ф. Шаферс. // Поверхность Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №2. – С.3-14.

A5. Смертин, Р. М. Микроструктура переходных границ в многослойных Mo/Be-системах / Смертин Р. М., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И., Юнин П. А., Тригуб А. Л. // Журнал технической физики. – 2020. – Т.90. – В.11. – С. 1884-1892.

A6. Kumar, N. Quantum Confinement Effect in Nanoscale Mo/Si Multilayer Structure / N. Kumar, A. T. Kozakov, A. V. Nezhdanov, R. M. Smertin, V. N.

Polkovnikov, N. I. Chkhalo, A. I. Mashin, Aleksandr; A. N. Nikolskii, A. A. Scrjabin, S. Y. Zuev, // J. Phys. Chem. C. – 2020. – V.124. – P.17795-17805/

A7. Kumar, N. Phase-microstructure of Mo/Si nanoscale multilayer and intermetallic compound formation in interfaces / N. Kumar, A. V. Nezhdanov, R. M. Smertin, V. N. Polkovnikov, P. A. Yunin, S. A. Garakhin, N. I. Chkhalo, A. I. Mashin, M. A. Kudryashov, D. A. Usanov // Intermetallics. – 2020, – 125, – 106872.

A8. Filatova, E. O. Effect of Insertion of B₄C at the Interface Mo/Be Depending on the Film Order / E. O. Filatova, S. S. Sakhonenkov, S. A. Kasatkov, A. U. Gaisin, E. S. Fateeva, R. M. Smertin, V. N. Polkovnikov // J. Phys. Chem. C. – 2020. – V.124. – №41. – P.22601–22609.

A9. Kumar, N. Raman scattering study of nanoscale Mo/Si and Mo/Be periodic multilayer structures / N. Kumar, V. A. Volodin, R. M. Smertin, P. A. Yunin, V. N. Polkovnoikov, K. Panda, A. N. Nechay, N. I. Chkhalo // J. Vac. Sci. Technol. – 2020. – V.38. – P.063408.

A10. Kumar, N. X-ray photoelectron studies of near surface oxidation and plasmon excitation in spatially confined bi- and tri- layers periodic multilayer mirrors / N. Kumar, A. T. Kozakov, R. M. Smertin, V. N. Polkovnikov, N. I. Chkhalo, A. V. Nikolskii, A. A. Scrjabin // Thin Solid Films. – 2021. – V.717. – P.138449.

A11. Kumar, N. Investigation of transverse optical phonon of thin Si films embedded in periodic Mo/Si and W/Si multilayer mirrors / N. Kumar, A. V. Nezhdanov, S. A. Garakhin, R. M. Smertin, P. A. Yunin, V. N. Polkovnikov, N. I. Chkhalo, A. I. Mashin // Surfaces and Interfaces. – 2021. – V.25. – P. 101270.

A12. Barysheva, M. M. Broadband normal-incidence mirrors for a range of 111–138 Å based on an a-periodic Mo/Be multilayer structure / M. M. Barysheva, S. A. Garakhin, A. O. Kolesnikov, A. S. Pirozhkov, V. N. Polkovnikov, E. N. Ragozin, A. N. Shatokhin, R. M. Smertin, M. V. Svechnikov, E. A. Vishnyakov // Optical Materials Express. – 2021. – V.11. – №9. – P.3038-3048.

A13. Водопьянов, А. В. Измерения абсолютных интенсивностей спектральных линий ионов Kr, Ar и O в диапазоне длин волн 10–18 нм при

импульсном лазерном возбуждении / Водопьянов, А. В., Гарахин, С. А., Забродин, И. Г., Зуев, С. Ю., Лопатин, А. Я., Нечай, А. Н., А. Е. Пестов, А. А. Перекалов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Чхало, Н. И. // Квантовая электроника. – 2021. – Т.51. – №8. – Р.700-707.

A14. Kumar, N. Volume plasmon blueshift in dimensionally thin beryllium and silicon films embedded within Be/Si periodic multilayer mirrors / N. Kumar, A. Nezhdanov, R. Smertin, V. Polkovnikov, N. I. Chkhalo, V. Golyashov, O. Tereshchenko // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2022 – V.24 – №26. – P.15951-15957.

A15. Smertin, R. M. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors / Smertin, R. M., Chkhalo, N. I., Drozdov, M. N., Garakhin, S. A., Zuev, S. Y., Polkovnikov, V. N., Shaposhniko N. N. & Yunin, P. A. // Optics Express. – 2022. – V.30 – №26. – P.46749-46761.

A16. 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. Y. // Thin Solid Films. – 2023. – V.782. – P.140044.

A17. Смертин, Р. М. Исследование рентгенооптических и механических характеристик многослойных зеркал C/Si и B₄C/Si / Р. М. Смертин, М. М. Барышева, С. А. Гарахин, М. В. Зорина, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, Д. Б. Радищев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023 – №12. – С.39-45.

A18. Kumar, N. Raman scattering studies of Si/B₄C periodic multilayer mirrors with an operating wavelength of 13.5 nm. / Kumar, N., Smertin, R. M., Prathibha, B. S., Nezhdanov, A. V., Drozdov, M. N., Polkovnikov, V. N., Chkhalo, N. I. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2023. – V.56. – №25. – P.255301.

A19. Smertin, R. Stress, reflectance, and stability of Ru/Be multilayer coatings with Mo interlayers near the 11 nm wavelength. / Smertin, R., Chkhalo, N., Garakhin,

S., Polkovnikov, V., & Zuev, S. // Optics Letters. – 2024. – V.49. – №.13. – P.3690-3692.

Материалы конференций и тезисы докладов

T1. Смертин, Р. М. Влияние термического отжига на свойства многослойных зеркал Mo/Be / Р. М. Смертин, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашченко, М. В. Свечников, M. G. Sertsu, A. Sokolov, Н. И. Чхало, F. Schafers, П. А. Юнин // Материалы XXIII симпозиума, г. Нижний Новгород. – 2019. – С.525-526.

T2. Barysheva, M. M. Broadband stack mirrors for the EUV range: calculation, manufacturing and characterization / M. M. Barysheva, N. I. Chkhalo, S. A. Garakhin, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, R. M. Smertin, M. V. Svechnikov // 313. PTB Seminar VUV and EUV Metrology, 2019, Berlin, Germany. – 2019.

T3. Kumar N. Properties of quantum mechanically confined Si layer in Mo/Si multilayer Nanofilms / Kumar N., Nezhdanov A. V., Smertin R. M., Zuev S. Y., Polkovnikov V. N., Chkhalo N. I., Mashin A. I., Kudryashov M. A., Usanov D. A. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 831.

T4. Свечников, М. В. Эффективность резонансных многослойных мишеней в качестве источников ЭУФ излучения / Свечников М. В., Гарахин С. А., Лопатин А. Я., Пестов А. Е., Плешков Р. С., Смертин Р. М., Чхало Н. И. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 909.

T5. Сахоненков, С. С. Механизм формирования межслоевой области в многослойной структуре Mo/(B₄C)/Be / С. С. Сахоненков, С. А. Касатиков, А. У. Гайсин, В. Н. Полковников, Р. М. Смертин, Е. О. Филатова // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 907-908.

T6. Смертин Р.М. Бесстрессовые высокоотражающие многослойные зеркала на длину волны 13,5 нм / Смертин Р.М., Зуев С. Ю.,

Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 914.

Т7. Смертин Р.М. Структура переходных слоев в многослойных зеркалах Mo/Be / Смертин Р. М., Полковников В. Н., Тригуб А. Л., Чхало Н. И., Юнин П. А., Якунин С. Н. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 916.

Т8. Чхало Н.И. Состояние дел и перспективы развития безмасочной нанолитографии на длине волны 13.5 нм / Чхало Н. И., Барышева М. М., Зуев С. Ю., Лопатин А. Я., Малышев И. В., Пестов А. Е., Полковников М. Н., Салащенко Н. Н., Смертин Р. М., Торопов М. Н. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 924.

Т9. Kumar, N. Плазмонное возбуждение кристаллических нанокластеров в многослойных зеркалах, работающих в ЭУФ и рентгеновской области длин волн / N. Kumar, A. T. Kozakov, A. V. Nezhdanov, V. N. Polkovnikov, R. M. Smertin, R. S. Pleshkov, N. I. Chkhalo // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 362.

Т10. Водопьянов, А. В. Абсолютно калиброванный спектрометр для исследования эмиссии в ЭУФ и МР диапазонах / А. В. Водопьянов, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, А. Е. Пестов, Р. С. Плешков, Н. Н. Салащенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Н. И. Чхало // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 379.

Т11. Смертин, Р. М. Изучение влияния барьерных и аморфизующих слоев на профиль диэлектрической проницаемости и межслоевую шероховатость в многослойных зеркалах Ru/Be / Р. М. Смертин, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, М. В. Свечников, Н. И. Чхало // Материалы XXV

Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 454.

T12. Дубинин, И. С. Расчет, синтез и изучение свойств зеркал со спектральной полосой пропускания, совпадающей с эмиссионными линиями Si, Be, В, Хе, Кг / И. С. Дубинин, С. А. Гарахин, С. Ю. Зуев, Н. Н. Цыбин, А. Я. Лопатин, Р. М. Смертин, В.Н. Полковников, Н. И. Чхало // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 397.

T13. Гарахин, С. А. Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6,6-32 нм мишени из нержавеющей стали при импульсном лазерном возбуждении / С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. Е. Пестов, А. А. Перекалов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, Р. М. Смертин, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало // Тезисы докладов объединённой конференции "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике". – 2021ю – С.289-290.

T14. Гарахин, С. А. Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 3-32 нм мишени из углерода при импульсном лазерном возбуждении / Гарахин С. А., Забродин И. Г., Зуев С. Ю., Лопатин А. Я., Нечай А. Н., Пестов А. Е., Перекалов А. А., Плешков Р. С., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Смертин Р. М., Цыбин Н. Н., Чхало Н. И. // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 531.

T15. Смертин, Р. М. Изучение влияния барьерных слоев на межслоевую шероховатость в многослойных зеркалах Ru/Be / Р. М. Смертин, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. И. Чхало // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 608.

T16. Смертин, Р. М. Влияние буферных слоев Мо на микроструктуру и отражательные характеристики системы Ru/Be / Р. М. Смертин, В. Н. Полковников, М. Н. Дроздов, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало, П. А. Юнин,

С. А. Гарахин, С.Ю. Зуев // Труды школы молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». Нижний Новгород, 19-22 сентября. – 2022. – С.64-65.

T17. Полковников, В. Н. Определение внутренних напряжений многослойных структур Mo/Si интерферометрическим методом / В. Н. Полковников, Н. И. Чхало, М. Н. Торопов, Р. М. Смертин, Р. А. Шапошников // Труды школы молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». Нижний Новгород. – 2022. – С.73-74.

T18. Смертин, Р. М. Влияние буферных слоев Мо на микроструктуру слоев и отражательные характеристики Ru/Be многослойных зеркал / Р. М. Смертин, С. А. Гарахин, М. Н. Дроздов, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало, П. А. Юнин // Международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – Т.2. – С. 908.

T19. Гусева, В. Е. Двухзеркальный объектив Шварцшильда для исследования лазерной искры в ЛПИ / В. Е. Гусева, И. В. Малышев, А. Н. Нечай, А. А. Перекалов, А. Е. Пестов, Д. Г. Реунов, Р. М. Смертин, М. Н. Торопов, Н. Н. Цыбин, Н. И. Чхало // Труды XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и Нанозлектроника». – 2024. – Т.1. – С.505-506.

Патенты

П.1 Абрамов И.С., Голубев С.В., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Смертин Р.М., Чхало Н.И., Шапошников Р.А. / Мощный источник направленного экстремального ультрафиолетового излучения с длиной волны 9 - 12 нм для проекционной литографии высокого разрешения. // Патент на изобретение № 2808771. Заявка № 2023116539. Приоритет изобретения 23 июня 2023 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05 декабря 2023 г. Срок до 23 июня 2043 г.