

На правах рукописи



Смертин Руслан Маратович

**Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной
рентгеновской литографии**

Специальность 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной
физики»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико – математических наук

Нижний Новгород 2025

Работа выполнена в Институте Физики Микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"(ИФМ РАН), Нижний Новгород.

Научный руководитель: **Чхало Николай Иванович**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отдела многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН.

Официальные оппоненты: **Горай Леонид Иванович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН», г. Санкт-Петербург.

Кузин Сергей Вадимович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт солнечно-земной физики СО РАН», г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 2 октября 2025 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова" Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте:

http://www.ipmras.ru/UserFiles/Diss/2025/smertin-ruslan-maratovich/diss_SmertinRuslanMaratovich.pdf

Автореферат разослан _____ июля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

профессор РАН


Водолазов Денис Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Литография является ключевой технологией производства элементов микроэлектроники. С 2018 г. при производстве слоев чипов с минимальными топологическими размерами используется проекционная ЭУФ (экстремальное ультрафиолетовое излучение) литография с рабочей длиной волны 13.5 нм. Для этих целей используются установки серии NXE:3400 компании ASML [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 $NA = 0.55$. Но, как показано в [2], разработчики сталкиваются с проблемами, в том числе связанными с экранированием стенками маски проецируемых наноструктур.

Альтернативой увеличению числовой апертуры для повышения разрешающей способности литографа является уменьшение длины волны. В [3] впервые было предложено использовать для литографии следующего поколения длину волны в окрестности 6.7 нм. Выбор обусловлен следующими соображениями. Во-первых, вдвое повышает разрешение. Во-вторых, в этом диапазоне многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) La/B теоретически имеют коэффициент отражения более 80%. Однако в силу недостаточно высоких экспериментально достигнутых коэффициентов отражения МРЗ La/B, около 64% [4, 5], и узкой, по сравнению с эмиссионной полосой источника, спектральной полосой пропускания многозеркальной системы, низкой конверсионной эффективностью лазерно-плазменных источников на основе ионов Tb и Gd [6], а также несовпадения максимумов отражения МРЗ 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 повысит разрешающую способность на ~20%. Во-вторых, в этой спектральной области МРЗ Ru/Be теоретически 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. Газовый источник излучения 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 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 – решить так 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 (БРПЛ), 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, толщины.

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

Цели 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 также поиск 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

1) Впервые исследована микроструктура слоев и интерфейсов МРЗ Мо/Ве 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 Ве/Ру и МРЗ Ве/Ру с буферными слоями Мо 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 Мо/Ру/Мо/Ве 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 Мо/Си 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.

Теоретическая и практическая значимость

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 Ру/Ве 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 Мо/Ве/Си, 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 исследования

Объектами для исследования стали многослойные периодические системы Mo/Be, Ru/Be, Ru/Be с буферными слоями Mo на различных границах, Mo (Zr, Nb, Y)/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 жесткой 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).

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 подложек проводилось оптическим и интерферометрическим методами.

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.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Переходные области в МРЗ Мо/Ве состоят из двух соединений. 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} . 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/Ве ограничены широкими переходными границами раздела (Ru-на-Ве~1 нм, Ве-на-Ru~0.4 нм) и перемешиванием материалов слоев между собой. Внедрение буферных слоев Мо на границы раздела приводит к меньшему перемешиванию слоев системы между собой и уменьшению ширины переходной границы Ru-на-Ве до 0.8 нм, что позволило получить рекордный коэффициент отражения ($R=72.2\%$). МРЗ Мо/Ru/Мо/Ве обладает временной стабильностью коэффициента отражения и околонулевыми механическими внутренними напряжениями.

3) МРЗ Мо/Ве/Si с толщинами слоев Si~1 нм, Мо~2.8 нм, Ве~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.

Личный вклад автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, подготовка и проведение

экспериментов, 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.

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, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII Международные симпозиумы «Нанозифика и нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 года. 313. PTB Seminar VUV and EUV Metrology, Berlin, Germany, October 22 – 23, 2019 год. Конференция "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микрозлектронике", г. Черногловка, 13 – 17 сентября, 2021 год. Научная школа «Современная рентгеновская оптика», г. Нижний Новгород, 14–17 сентября, 2022 год.

Публикации

Результаты работы опубликованы в оригинальных статьях в отечественных и зарубежных журналах, сборниках трудов и тезисов докладов на научных конференциях. Всего по материалам диссертации опубликовано 39 работ, из них 19 статей в реферируемых журналах и 1 патент. Полный список публикаций автора по теме диссертационной работы приведен в конце диссертации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 139 страницах, содержит 53 рисунка и 18 таблиц. Список литературы содержит 86 наименований.

Основное содержание работы

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 на основе Mo/Be и Ru/Be, предназначенных для работы в проекционной рентгеновской литографии нового поколения на длине волн в окрестности 11 нм.

Установлена зависимость коэффициента отражения на длине волны 11.4 нм (рис. 1 а) и внутренней микроструктуры (рис. 1 б) МРЗ Mo/Be в результате изотермического вакуумного отжига. МРЗ Mo/Be обладает высоким уровнем термической стабильности – значение периода МРЗ не изменяется вплоть до температуры 300°C и времени отжига 4 часа. При времени отжига 1 час до температуры 300°C происходит рост коэффициента отражения на ~6% относительно исходного значения.

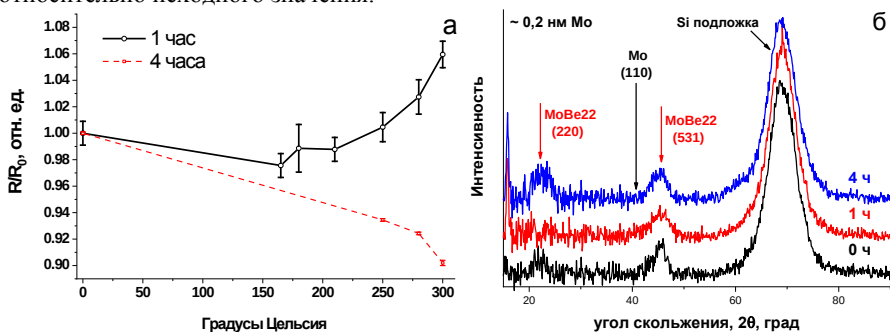


Рисунок 1 – Зависимости максимума коэффициента отражения на $\lambda=11.4$ нм нормированного на R_0 исходного образца МРЗ Mo/Be от температуры и времени отжига (а); рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0.154$ нм) многослойной периодической системы Mo/Be с толщиной Mo в периоде ~0.2 нм, отожженной при 300 °C при разном времени отжига (б).

Различными методами (рис. 1 б) были определены состав и ширины переходных границ (s) в исходном состоянии и после отжига. В исходном состоянии – $s(\text{Be-на-Mo}) \sim 0.35$ нм (состав – MoBe_{12} или MoBe_{22}), $s(\text{Mo-на-Be}) \sim 0.67$ нм (состав – MoBe_2). При отжиге при 300°C в течении одного

часа ширины переходных границ изменяются очень слабо $s(\text{Be-на-Mo}) \sim 0.4$ нм, $s(\text{Mo-на-Be}) \sim 0.75$ нм, а их состав остается неизменным. При отжиге при 300°C в течении четырех часов ширины переходных границ изменяются значительно и изменяется их состав – $s(\text{Be-на-Mo}) \sim 0.49$ нм (состав – MoBe_2), $s(\text{Mo-на-Be}) \sim 0.86$ нм (состав – MoBe_2).

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 [14]. Увеличения времени отжига до 4-х часов приводит к падению коэффициента отражения из-за значительного изменения внутренней микроструктуры.

Установлена зависимость коэффициента отражения МРЗ Ru/Be от доли толщины Ru в периоде ($\gamma=t(\text{Ru})/d$). Максимум $R \sim 67\%$ и $\Delta\lambda \sim 0.34$ нм приходится на $\gamma=0.47$. Максимальное значение коэффициента отражения ограничено перемешиванием материалов слоев между собой и большим значением ширин переходных границ: $s(\text{Ru-на-Be})=1.1$ нм, $s(\text{Be-на-Ru})=0.45$ нм. Добавление буферного слоя Mo в МРЗ Ru/Be как на одну, так и на другую границу раздела приводит к росту коэффициента отражения. Максимальное значение коэффициента отражения достигается при нанесении слоя Mo: 0.2 нм на границу Ru-на-Be ($R=69\%$, $\Delta\lambda=0.38$ нм) и 0.4 нм на границу Be-на-Ru ($R=69\%$, $\Delta\lambda=0.37$ нм).

Осаждение буферных слоев Mo на обе границы раздела одновременно привело к существенному улучшению рентгенооптических характеристик. Максимальное значение коэффициента отражения составило рекордные $R=72.2\%$ (рис. 2) при толщинах буферных слоев Mo: Ru-на-Be – 0.2 нм, а Be-на-Ru – 0.4 нм. Также следует отметить, что при всех изученных значениях толщин буферных слоев Mo, коэффициент отражения выше 70%, а спектральная ширина отражения шире, чем у МРЗ Ru/Be без буферных слоев Mo.

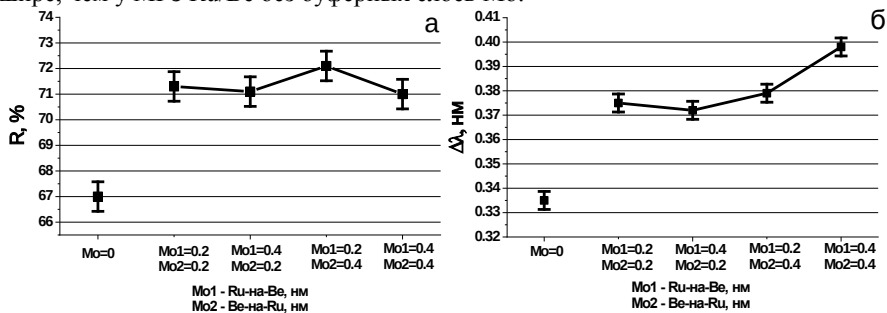


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента отражения (а) и спектральной ширины (б) МРЗ Mo/Be/Mo/Ru на длине волны 11.4 нм от толщины слоев Mo в периоде.

Причиной такого улучшения рентгенооптических характеристик служит снижение степени перемешивания слоев многослойной системы между собой и уменьшение ширины переходной границы $s(\text{Ru-на-Be})$ с 1.1 нм до 0.8 нм (рис. 3). При этом, шероховатость межслоевых границ не изменяется.

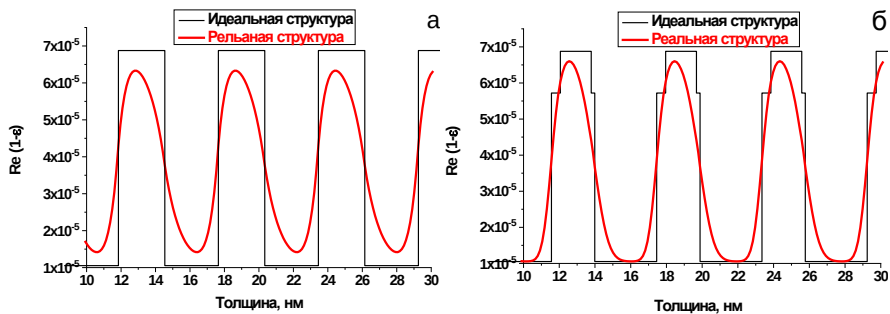


Рисунок 3 – Восстановленные по данным рентгеновской рефлектометрии профили электронной плотности в МРЗ Ru/Be (а) и МРЗ Мо/Ru/Mo/Be (б).

Зависимость типа «Меандр» соответствует табличным значениям диэлектрической проницаемости и плотности материалов, и нулевым межслоевым шероховатостям, плавные кривые – восстановленные профили реальных МРЗ по данным рентгеновского отражения.

Проверка временной стабильности рентгенооптических характеристик МРЗ Ru/Be в течении двух лет показала, что МРЗ Ru/Be без буферных слоев Мо снизило отражательную способность на 2% в абсолютных и на 3% в относительных единицах за 2 года, а МРЗ Мо/Ru/Mo/Be сохранило свою отражательную способность ($R=72.2\%$), в пределах погрешности измерения, что говорит о высокой стабильности микроструктуры слоев в этом МРЗ с течением времени.

В МРЗ Мо/Ru/Mo/Be получены околонулевые значения внутренних напряжений и доказано существование бесстрессового состояния при значении отражательной способности не ниже 71%.

Проведено сравнение оптической эффективности (ξ) 12-ти зеркальной литографических установок на длинах волн 13.5нм (МРЗ Мо/B₄C/Si [15]: $R=70.15\%$, $\Delta\lambda=0.5$ нм) и 11.2 нм (МРЗ Мо/Be [16]: $R=70.2\%$, $\Delta\lambda=0.26$ нм и Ru/Be: $R=72.2\%$, $\Delta\lambda=0.38$ нм) (табл. 1).

$$\xi = \int R(E)^{12} dE \quad (1)$$

Таблица 1 - Сравнение эффективности 12-ти зеркальных оптических систем литографических установок на длинах волн 13.5 нм и 11.2 нм.

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

Согласно расчетам, 12-ти зеркальная оптическая система на основе Ru/Be оптики имеет на 36% большую оптическую эффективность, чем оптическая система на основе Mo/Si оптики для литографии на длине волны 13.5нм. 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 потребуются 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.

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.

Осаждение МРЗ на МЭМС микрозеркал вводит ряд ограничений. Из-за малой толщины микрозеркал, соизмеримых с общей толщиной осаждаемого МРЗ, необходимо осаждать бесстрессовое покрытие, которое не приведет к искажению поверхности микрозеркала. Теоретические оценки показывают, что для сохранения плоскостности микрозеркал на уровне 10 нм, уровень внутренних механических напряжений не должен превышать $|\sigma| \leq 10$ МПа. Также остается требование на заметные коэффициенты отражения на рабочей 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, экспериментально максимальный коэффициент отражательная зеркал составляет $R=70.15\%$ [15]. Маска в литографической установке является только одним элементом из всех. Уменьшение R 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.

Исследованы зависимости коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм и внутренних механических напряжений в МРЗ Mo/Be/Si от толщин слоев в периоде. Обнаружено, что при значениях толщин слоев Si~1 нм, Mo~2.8 нм, Be~3.2 нм достигаются высокие, на уровне 66-67%, коэффициенты отражения при «нулевых» значениях механических напряжений. В результате исследования установлено, что осаждение металло-содержащего МРЗ на поверхность МЭМС микрозеркал приводит к замыканию электрических контактов под микрозеркалами и выходу МЭМС из рабочего состояния. В этой связи вводится новое ограничение на МРЗ – высокий уровень удельного электросопротивления на уровне $\rho \sim 500 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ нм}$ или больше.

Исследованы физические и рентгенооптические характеристики МРЗ на основе Mo (Zr, Nb, Y)/Si, изготовленных в среде Ar+N₂ и Ar+O₂. Добавление активного газа (N₂ или O₂) в процессе синтеза МРЗ приводит к росту

электросопротивления, однако добиться и околонулевого уровня внутренних напряжений и высокого значения удельного электросопротивления в системах с металлами не удалось.

Далее исследовались МРЗ, состоящие из материалов с изначально высоким уровнем электросопротивления – С, Si и В₄С, которые на длине волны 13.5 нм могут обеспечить заметные коэффициенты отражения. Исследовались различные методы понижения уровня внутренних напряжений у пленок в результате роста – изготовление при повышенном значении рабочего давления в камере и добавление второго газа – водорода в процессе роста пленок.

Повышение значения рабочего давления до $\sim 1.2 \cdot 10^{-2}$ Торр при синтезе МРЗ C/Si и В₄C/Si приводит к уменьшению значения внутренних напряжений к околонулевым значениям. Однако, при этом, коэффициент отражения на $\lambda=13.5$ нм также опускается до околонулевого уровня из-за большого количества дефектов в МРЗ в результате изготовления.

Добавление водорода в среду рабочего газа при изготовлении МРЗ В₄C/Si приводит к уменьшению значения внутренних напряжений к околонулевым значениям при R~6% на $\lambda=13.5$ нм. Однако, из-за эффекта блистеринга, использовать данную систему в качестве отражающего покрытия невозможно.

Добавление водорода в среду рабочего газа при изготовлении МРЗ C/Si приводит к уменьшению значения внутренних напряжений к околонулевым значениям при сохранении заметного R на $\lambda=13.5$ нм (табл. 2).

Таблица 2 - Зависимость коэффициента отражения и механических напряжений в МРЗ C/Si от содержания Ar : H₂ и доли C в периоде МРЗ.

Ar : H ₂	t(C)/d	R, %	s, МПа
1 : 0	0.4	32.5	-900
1 : 0.75	0.5	13	-60
1 : 0.75	0.57	12.5	-35
1 : 0.75	0.64	11	-7
1 : 0.87	0.64	10	-4
1 : 1.	0.64	11.6	+10
1 : 1.2	0.64	10	+7
1 : 1.5	0.64	6,47	+20

При доле C в периоде МРЗ $\gamma \sim 0.64$ и при соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 МРЗ C/Si обеспечивает все три необходимых условия для осаждения его на поверхность МЭМС микрозеркал – околонулевой уровень внутренних напряжений ($|s| \leq 10$ МПа), высокий уровень удельного электросопротивления ($\rho > 500$ Ом•100) и заметные для безмасочной литографии коэффициент отражения на рабочей длине волны 13.5 нм (R~11 %). Таким образом, найдено оптимальное МРЗ для осаждения на поверхность МЭМС микрозеркал.

В четвертой главе изучены свойства коммерчески доступной матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600 фирмы Texas Instruments. Микрозеркала в МЭМС изначально характеризуются заметной неплоскостностью

– значение СКО от плоскости исходных микрозеркал порядка 6 -7 нм, также в центре каждого микрозеркала имеется заметный провал, объясняющийся особенностями конструкции крепления микрозеркала на одну ножку. Исходная шероховатость поверхности микрозеркал составила $\sigma \sim 2$ нм.

Изучена долговременная стабильность работы МЭМС. После съема защитного стекла, была обнаружена деградация работоспособности МЭМС, проявляющаяся в том, что микрозеркала переставали управляться. Нанесения пассивирующего покрытия Al_2O_3 , толщиной около 2 нм, сразу после съема защитного стекла, полностью предотвращает деградацию МЭМС.

Отработана методика нанесения на МЭМС микрозеркал диэлектрических, бесстрессовых МРЗ C/Si, отражающих рентгеновское излучение на длине волны 13.5 нм. Пиковый коэффициент отражения на рабочей длине волны 13.5 нм составил $R=2.8\%$ при угле скольжения 67° (рис. 4), а интегральный $R=7.1\%$. Меньшее пиковое значение коэффициента отражения МРЗ C/Si обусловлено угловым разбросом микрозеркал от среднего положения и большим уровнем шероховатости поверхности.

Проведено облучение МЭМС микрозеркал с пассивирующим Al_2O_3 и отражающим C/Si покрытиями излучением с длиной волны около 13.5 нм и плотностью мощности 0.21 Вт/см^2 , моделирующей условия реального безмасочного литографа. МЭМС микрозеркал полностью сохранило работоспособность после облучения в течении 40 часов (рис. 4). Обсуждаются проблемы применения этого типа МЭМС для создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии.

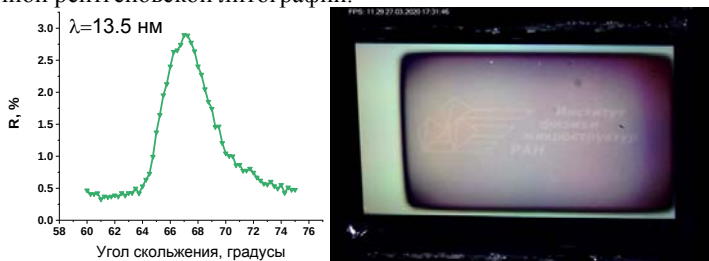


Рисунок 4 – Угловая зависимость коэффициента отражения (слева) и фрагмент видео (справа) работоспособной МЭМС, отражающей излучение с $\lambda=13.5$ нм.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы, которые заключаются в следующем:

1) Изучены микроструктура и ее изменение в результате изотермического вакуумного отжига рентгеновских зеркал Mo/Be. Установлено, что 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} . 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/Be. Коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм составил $R=66\%$ при $\Delta\lambda=0.33$ нм. Коэффициент отражения ограничен сильным перемешиванием материалов системы между собой и большим значением ширин переходных границ: $s(\text{Ru-на-Be})\sim 1$ нм, $s(\text{Be-на-Ru})\sim 0.4$ нм.

3) Изучены микроструктура и отражательные характеристики в окрестности длины волны 11 нм МРЗ Ru/Be с буферными слоями Mo 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 $\text{B}_4\text{C}/\text{Si}$, 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 $\text{B}_4\text{C}/\text{Si}$, 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 С (~0.8 от табличного значения) и, наоборот, повышенной плотностью слоев Si, а также большой межслоевой шероховатостью (~ 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/см², моделирующей условия реального безмасочного литографа. Подтверждена реализуемость создания динамической маски на основе МЭМС микрозеркал для безмасочной рентгеновской литографии.

Список публикаций автора по теме диссертации

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. Салашенко, М. В. Свечников, М. G. Sertsu, A. Sokolov, Н. И. Чхало, F. Schöfers, 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. Салашенко, 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. Салашенко, М. В. Свечников, М. Г. Сертсу, Р. М. Смертин, А. Соколов, Н. И. Чхало, Ф. Шаферс. // Поверхность Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №2. – С.3-14.

A5. Смертин, Р. М. Микроструктура переходных границ в многослойных Mo/Be-системах / Смертин Р. М., Полковников В. Н., Салашенко 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. Polkovnikov, 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. Scryabin // 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 Kг, Ag 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. Салашенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Чхало, Н. И. // Квантовая электроника. – 2021. – Т.51. – №8. – P.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., Shaposhnikov 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.

Основные материалы конференций и тезисы докладов

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

T2. Смертин Р.М. Бесстрессовые высокоотражающие многослойные зеркала на длину волны 13,5 нм / Смертин Р. М., Зуев С. Ю., Полковников В. Н., Салашенко Н. Н., Чхало Н. И. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 914.

T3. 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., Салашенко Н. Н., Смертин Р. М., Торопов М. Н. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 924.

T4. Смертин, Р. М. Влияние буферных слоев Мо на микроструктуру слоев и отражательные характеристики Ру/Ве многослойных зеркал / Р. М. Смертин, С. А. Гарахин, М. Н. Дроздов, С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, Н. И. Чхало, П. А. Юнин // Международного симпозиума «Нанопизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2023. – Т.2. – С. 908.

Патенты

П.1 Абрамов И. С., Голубев С. В., Нечай А. Н., Перекалов А. А., Полковников В. Н., Салашенко Н. Н., Смертин Р. М., Чхало Н. И., Шапошников Р. А. / 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.

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. Салашченко, Н. Н. Коротковолновая проекционная литография / Н. Н. Салашченко, 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. 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.
15. 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.
16. 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.

Смертин Руслан Маратович

Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской
литографии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат.
наук

Подписано к печати 26.06.2025

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.

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

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