

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

На правах рукописи

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно - квалификационной работы (диссертации)

«МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ БЕЗМАСОЧНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ»

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Научная специальность: 1.2.3. – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Выполнил аспирант: Смертин Руслан Маратович

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук:

Чхало Николай Иванович

дата: ____ июня 2022 г.

Нижний Новгород - 2022 г.

Актуальность темы исследования

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 УФ литография на рабочей длине волны 13,5 нм. Для этих целей 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 λ/λ_V многослойные зеркала теоретически имеют коэффициент отражения более 80%. Однако, в последствие, в силу недостаточно высоких экспериментальных коэффициентов отражения многослойных зеркал, 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 МРЗ и эмиссионной полосы лазерно-плазменного источника, в [7] был сделан вывод о бесперспективности этой длины волны для литографии. Поэтому поиск высокоотражающих многослойных зеркал с коэффициентами отражения не ниже чем обеспечивают Mo/Si на длине волны 13,5 нм является крайне актуальным. Одной из перспективных длин волн является 11,2 нм. Данный переход позволит автоматически повысить разрешающую способность на ~20%.

Основанной проблемой традиционной литографии, основанной на проекции изображения маски 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.

Решение этой проблемы – развитие безмасочных методов литографии. Большие надежды возлагались на многопучковую электронную литографию. В частности, компании Mapper Lithgraphy удалось достичь производительности более 1 пластины диаметром 300 мм/час [9]. Однако основную проблему многопучковой электронной литографии – электромагнитное взаимодействие между ними, так решить и не удалось.

Одним из перспективных кандидатов является безмасочная рентгеновская литография (БМРЛ), предложенная в [10]. Пространственное разрешение определяется короткой длиной волны, а функцию маски выполняет МЭМС микрозеркал. В работах [11-13] показано, что: во-первых, на экспериментальную МЭМС удалось нанести отражающие 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, отражающей рентгеновское излучение. В упомянутой выше работе после нанесения токопроводящих Mo/Si покрытий, МЭМС потеряла работоспособность.

Еще одна проблема нанесения отражающих покрытий на МЭМС являются механические напряжения в пленках, приводящие к катастрофическому искажению формы поверхности микрозеркал в силу малой, на уровне долей нанометров, толщины микрозеркала.

Поэтому поиск новых композиций многослойных зеркал, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения при отсутствии электропроводности и внутренних механических напряжений является крайне актуальной задачей для развития безмасочной рентгеновской литографии.

Цель и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы являются поиск новых композиций многослойных зеркал на основе бериллия, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения в окрестности 11 нм, а также непроводящих, без внутренних напряжений многослойных систем 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 многослойных структур Mo/Be, оптимизированных для работы на длине волны 11.2 нм.

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

3. Поиск, синтез и изучение бесстрессовых, не проводящих многослойных структур для безмасочной литографии на длине волны 13.5 нм.

4. Нанесение и 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 многослойной системы 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 системы Be/Ru и системы Be/Ru с буферными слоями Mo на границах. Получен рекордный коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм, который составил 72% при ширине полосы отражения 0.35 нм.

3. Впервые предложен новый дизайн Mo/Si многослойного зеркала с «нулевым» внутренним стрессом и с коэффициентом отражения до 67% на длине волны 13,5 нм.

4. Впервые получена бесстрессовая, диэлектрическая многослойная система, оптимизированная для работы на длине волны 13,5 нм, и обладающая отражением на уровне $R \sim 11\%$.

Впервые на базе коммерчески доступной МЭМС микрозеркал изготовлен экспериментальный образец динамической маски и изучены коэффициенты отражения, долговременная стабильность и радиационная стойкость к облучению излучением с длинами волн в окрестности 13,5 нм.

Научная и практическая значимость

Результаты научно-квалификационной работы имеют научную и практическую ценность.

Экспериментально показана возможность создания высокоэффективных многослойных зеркал для литографических установок на длине волны в окрестности 11 нм. Переход на более короткую рабочую длину волны позволит увеличить разрешающую способность литографического процесса.

Экспериментально получена бесстрессовая высокоотражающая многослойная система Mo/Be/Si, оптимизированная для работы на длине волны 13,5 нм с высоким, до 67%, коэффициентом отражения для многослойных Mo/Si зеркал, которая представляет интерес для оптики дифракционного качества в окрестности длины волны 13.5 нм.

Экспериментально получена бесстрессовая и диэлектрическая многослойная система, обладающая коэффициентом отражения на уровне $R \sim 11\%$ на длине волны 13,5 нм

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, Mo/Si, Mo/Be/Si, C/Si, B₄C/Si и тонкие пленки данных материалов.

Тонкие пленки и многослойные зеркала наносились методом магнетронного распыления в среде аргона, а также смеси двух газов. 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 многослойных зеркал производились методами рентгеновской рефлектометрии. Характеристики структур определялась в результате обработки данных коэффициентов отражения, измеренных в мягкой и жёсткой рентгеновских областях с помощью лабораторных и синхротронных рефлектометров. Обработка проводилась с помощью программных пакетов IMD и Multifitting.

Исследования шероховатости, формы поверхности и размерные параметры микрозеркал производились с помощью атомно-силовой микроскопии, 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 проводилось методом широкоугольной рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра Bruker D8 Discover, EXAFS и РФЭС методом на оборудовании Курчатовского НИЦ 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 тонкой пленки на нее. Определение радиусов кривизны проводилось оптическим методом по изменению расстояния между двух параллельных лазерных лучей, падающих на исследуемый образец.

Определение электросопротивления многослойных систем проводилось 4-х контактным методом.

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 многослойной системе Mo/Be состоят из двух соединений. На границе Mo-на-Be образуется химическое соединение с малым содержанием бериллия – MoBe₂. На границе Be-на-Mo образуется химическое соединение с большим содержанием бериллия. Длины переходных слоев составили: Mo-on-Be-0,7 нм, Be-on-Mo-0,3 нм. На границе Mo-на-Be образуется химическое соединение с малым содержанием бериллия – MoBe₂. На границе Be-на-Mo образуется химическое соединение с большим содержанием бериллия. Вакуумный отжиг в течении 1 часа и температуре 300°C приводит к росту отражающей способности зеркал до 6 %, относительно исходного значения, в окрестности длины волны 11,4 нм. Увеличение длительности отжига из-за окисления верхних слоев приводит к падению коэффициентов отражения.

2. Разработанная методика роста Ru/Be многослойных зеркал позволила получить на длине волны 11,4 нм высокие коэффициенты отражения, до 66% и спектральную полосу

пропускания до 0,33 нм. Коэффициенты отражения ограничены переходными областями между пленками, ширины которых составили: Ru-на-Be~1 нм, Be-на-Ru~0.4 нм. Применение молибденовых прослоек в Ru/Be многослойном зеркале приводит к улучшению оптических характеристик и уменьшению длин переходных областей, в результате чего коэффициент отражения вырос до 72,1%.

3. Многослойное зеркало Mo/Be/Si с оптимальной толщиной слоя Si ~ 1 нм обладает околонулевыми внутренними напряжениями, при этом обеспечивает высокие, на уровне 66-67%, коэффициенты отражения на длине волны в окрестности 13,5 нм.

4. Добавление азота и кислорода в среду рабочего газа аргона при напылении Mo/Si многослойных зеркал приводит к увеличению электросопротивления многослойной системы. Наибольшее влияние на электросопротивление оказывает добавление кислорода. Параллельно с этим уменьшаются внутренние напряжения до ~ -200 МПа. В системах C/Si и B₄C/Si, изготовленных при большом значении рабочего давления, до ~1·10⁻² торр, наблюдается уменьшение плотности материала и внутренних напряжений, при одновременном росте величины шероховатости межслоевых границ. При добавлении в рабочий газ водорода в соотношении ~1:1 наблюдается уменьшение внутренних напряжений к нулевым значениям. При этом в B₄C/Si многослойных системах на поверхности образуются микрократеры, которые не позволяют использовать данную структуру в качестве отражающей оптики. Оптимальной оказалась система C/Si. Коэффициент отражения на длине волны 13,5 нм в бесстрессовом и диэлектрическом состоянии составил R ~ 11 %.

5. После нанесения бесстрессового и диэлектрического C/Si покрытия на МЭМС микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080pMVSPS600 на длине волны 13,5 нм был получен коэффициент отражения 3 %, а экспериментальные образцы сохраняли свою работоспособность в течение нескольких дней в случае нанесения покрытий на МЭМС после съема защитного стекла и в течение нескольких месяцев, в случае, когда сразу после снятия стекла, на поверхность МЭМС наносилось ALD покрытие. Облучение МЭМС излучением с длиной волны в окрестности 13,5 нм и с плотностью рентгеновской мощности до 0.1 мВт/см² не влияет на работоспособность МЭМС. Причиной низкого коэффициента отражения покрытий является большая, ~2 нм, шероховатость поверхности микрозеркал МЭМС.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертации были получены при определяющем участии автора.

Работы, связанные с синтезом и изучением структурных параметров многослойных зеркал по данным рентгеновской рефлектометрии были выполнены автором самостоятельно. Исследование отражательных характеристик многослойных зеркал с помощью четырехкристального дифрактометра с рабочей длиной волны 0,154 нм выполнены автором самостоятельно. Работы по измерению коэффициентов отражения в мягком рентгеновском диапазоне были выполнены при участии автора. Работы по определению значений внутренних напряжений исследуемых систем были выполнены автором самостоятельно. Работы по определению электросопротивления многослойных систем, изучению формы и шероховатости поверхности были выполнены при участии автора. Исследование по облучению МЭМС микрзеркал излучением с длиной волны в окрестности 13,5 нм были выполнены при участии автора. Все работы в НИЦ Курчатовский институт были выполнены при участии автора.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов, представленных в научно-квалификационной работе, достигается применением нескольких независимых экспериментальных методик, прямо или косвенно подтверждающих сделанные выводы, а также сопоставлением с данными, представленными в литературе.

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 нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 11 – 14 марта 2019 г. – 1 стендовый доклад

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

XXIV международный симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10 – 13 марта 2020 г. – 2 стендовых и 2 устных доклада

XXV международный симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 9 – 12 марта 2021 г. – 1 стендовый доклад

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

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

По теме научно-квалификационной работы опубликованы 15 печатных работы, в том числе 11 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, и 9 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов.

Структура научно-квалификационной работы

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 113 страницах, содержит 83 наименований библиографии, 41 рисунок и 14 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы научно-квалификационной работы. Формулируются цель 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.

Первая глава посвящена литературному обзору по теме диссертационной работы.

Среди разнообразия методов наноструктурирования вещества – искусственное получение физических объектов, у которых, как минимум, один из размеров меньше 100 нм, что существенно влияет на его физические свойства, выделяется литография, обеспечивающая наивысшую степень регулярности и точности воспроизведения размеров наноструктур. Для своего функционирования она 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, удваивается с переходом на новые (уменьшающиеся) технологические нормы [14-16]. Набор масок только при производстве одного чипа может стоить до нескольких десятков, а то и сотен миллионов рублей. Поэтому из-за высокой стоимости оборудования, дороговизны масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры проекционная фотолитография становится конкурентоспособной только при массовом производстве.

В настоящее время используется литографический процесс с рабочей длиной волны 13.5 нм [17-19]. Основной проблемой данной технологии является выход на предел разрешающей способности. Так в литографическая установка последнего поколения от компании ASML TWINSCAN NXE:3400B с проекционным объективом $NA=0,33$ обеспечивает разрешение 13 нм при однократном экспонировании [20]. А достижение суб-10 нм достигается только при технологии двойного рисования. Технология двойного рисования не дает возможности ее использования в промышленных нуждах. В этой связи возникает необходимость другого решения для увеличения разрешающей способности. Одно из таких решений – переход на более короткую длину волны – 11 нм. Данным переход позволит увеличить разрешающую способность на ~20% без существенного изменения технологии. Первой задачей данной работы является исследование возможности продвижения в область длин волн 11 нм с точки зрения достижения коэффициентов отражения зеркал не менее 70% для литографии следующего поколения.

Еще одним ключевым недостатком проекционной литографии является использование большого числа дорогостоящих шаблонов. Необходимость изготовления комплекта уникальных шаблонов для конкретного чипа приводит к длительным задержкам от момента заказа до изготовления интегральной схемы. Другой проблемой, связанной с шаблонами, является сильная зависимость стоимости чипа от объемов производства. Поэтому технология проекционной УФ (ЭУФ) литографии становится экономически оправданными только при массовом, от миллиона и более чипов в год, производстве. Однако, 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. В этой технологии пространственное разрешение обеспечивается достаточно короткой длиной волны (от 13,5 нм и ниже), а функцию масок выполняет система микрозеркал (DMD-digital micromirror device), управляемых 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 на базе коммерчески доступных МЭМС в данной работе было выбрано микрозеркальное устройство DLP6500FLQ, производства Texas Instruments. Это устройство предназначено для работы в видимой и ультрафиолетовой частях спектра. Оно состоит из множества микрозеркал, размером 7x7 мкм, толщиной порядка несколько сотен нанометров,

каждое из которых может независимо выходить из отражающего положения путем отклонения от изначального состояния на 12 градусов. В данной работе было предложено изготовить рентгеновское зеркало, которое обеспечит максимум отражения в окрестности длины волны 13,5 нм, от поверхности микрозеркал.

Также в главе описываются физические основы экспериментальных методов и технологическое оборудование, которое использовалось при исследовании и росте многослойных зеркал.

Вторая глава посвящена изучению физических и оптических характеристик многослойных систем Mo/Be и Ru/Be, предназначенных для работы в проекционной литографии на длины волн в окрестности 11 нм.

Первой системой в данной главе рассматривается система Mo/Be. Данная система обладает высоким уровнем отражательной способности в окрестности длины волны 11,2 нм ($R=70,3\%$ [21, 22]). В главе рассматриваются термическая стабильность и внутренняя микроструктура данной системы.

Одной из немаловажных характеристик рентгеновских зеркал является их временная и термическая стабильность. Так, в литографических установках, первое зеркало – коллектор испытывает значительные термические нагрузки. Под воздействием этих нагрузок оптические характеристики рентгеновских зеркал не должны изменяться. В рамках данной работы была исследована термическая стабильность системы Mo/Be. Образцы рентгеновских зеркал Mo/Be, оптимизированных на отражение в окрестности длины волны 11,4 нм были подвержены изотермическому вакуумному отжигу при разных температурах и разном времени отжига. У каждого исследуемого образца измерялись коэффициенты отражения в окрестности длины волны 11,4 нм и на длине волны 0,154 нм до отжига и после. На рисунке 1 приведен график зависимости максимума коэффициента отражения на длине волны 11,4 нм в зависимости от режима отжига, нормированного на значение отражения образца до изотермического отжига.

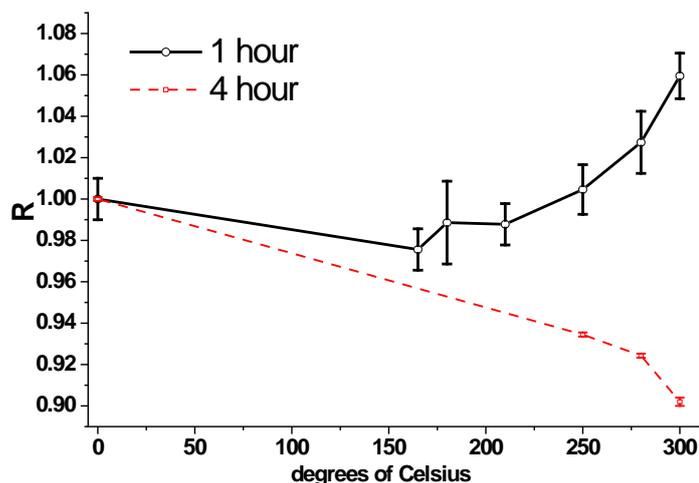


Рисунок 1 – Зависимости максимума коэффициента отражения зеркал Mo/Be на длине волны 11,34 нм от температуры отжига, отожженных при времени отжига 1 час и 4 часа. Коэффициент отражения нормирован на коэффициент отражения исходного образца.

Было установлено, что рентгеновское зеркало Mo/Be обладает высоким уровнем термической стабильности. Также, при вакуумном отжиге при 300°C в течении 1 часа можно добиться повышения отражательной способности на 6% относительно исходного значения. Такое улучшение оптических характеристик, согласно работе [23], связано с вытеснением кислорода из бериллиевых слоев зеркала. Однако, по мере увеличения времени отжига, в нашем случае до 4-х часов, коэффициент отражения, падает с увеличением температуры. Это связано как с ростом поглощения в верхних, окисленных слоях, так и с тем, что рост ширины переходных слоев дает больший негативный вклад в отражательную способность, чем вытеснение кислорода из слоев бериллия.

Как говорилось выше, система Mo/Be обладает высоким уровнем отражательной способности в окрестности длины волны 11,2 нм ($R=70,3\%$ [21, 22]). Это значение отражательной способности ниже максимально возможного из-за шероховатостей межслоевых границ и химического взаимодействия материалов многослойной системы. Значение шероховатостей межслоевых границ составляет Mo-on-Be-0,7 нм, Be-on-Mo-0,3 нм [22], однако их состав не был определен. В данной главе методами EXAFS спектроскопии, РФЭС методом, методом рентгеновского фазового анализа и методом комбинационного рассеяния определялась микроструктура многослойной системы.

Методом EXAFS спектроскопии и методом рентгеновского фазового анализа было определено, что в системе Mo/Be формируются два различных химических соединения, схожих по составу с $MoBe_2$ и $MoBe_{22}$. На рисунке 2 приведен пример рентгеновского фазового анализа от исследуемых образцов.

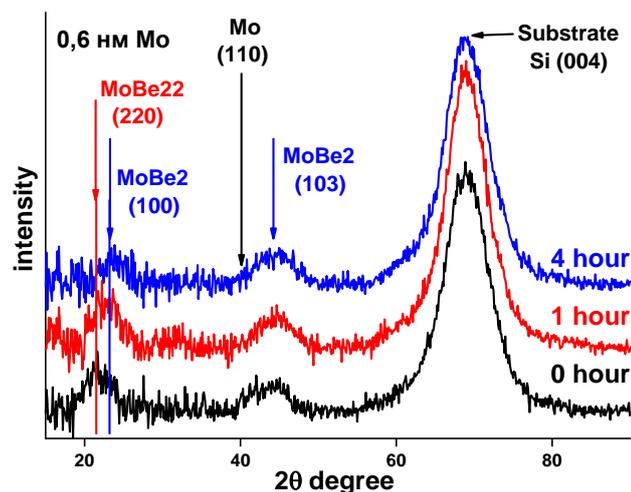


Рисунок 2 – Рентгеновский фазовый анализ ($\lambda=0,154\text{nm}$) многослойной периодической структуры Mo/Be с толщиной Mo в структуре $\sim 0,6\text{ nm}$.

Однако, данными методами невозможно однозначно установить какое соединение на какой границе раздела образуется. Данная проблема была решена методом РФЭС. Исследуя каждую границу раздела материалов отдельно на модельных системах было установлено: на границе раздела Be-на-Mo – MoBe_x , $x=8,9\pm 2,0$, а на границе Mo-на-Be – MoBe_x , $x=2\pm 0,2$. В случае с составом перемешанной зоны на границе Mo-на-Be не возникает противоречий – все три метода обнаруживают стехиометрический состав, схожий с MoBe_2 . Однако, с границей Be-на-Mo возникают противоречие – по результатам РФЭС ближайший стехиометрический состав к MoBe_x , $x=8,9\pm 2,0$ это MoBe_{12} , а по данным EXAFS и РФА образуется стехиометрический состав, близкий с MoBe_{22} . Таким образом, однозначно можно установить, что на границе Mo-на-Be образуется химическое соединение с малым содержанием Be, а именно MoBe_2 , а на границе Be-на-Mo образуется химическое соединение с большим содержанием Be: либо MoBe_{12} , либо MoBe_{22} .

Второй системой в данной главе была изучена Ru/Be система и Ru/Be система с добавлением буферных слоев Mo на границы раздела.

Система Ru/Be обладает максимумом отражающей способности в окрестности длины волны 11,4 нм на уровне $R\sim 66\%$. Данное значение отражающей способности выше, чем у других авторов [21]. Шероховатости межслоевых границ составляют Ru-на-Be $\sim 1\text{ nm}$, Be-на-Ru $\sim 0.4\text{ nm}$.

Система Ru/Be с буферными слоями Mo, толщинами 0,2 нм, 0,4 нм или 0,6 нм, на границах раздела слоев обладает более лучшими оптическими характеристика на рабочей длине волны в окрестности 11,4 нм, чем «чистая» система Ru/Be. Добавление Mo слоя на любую одну границу приводит к росту отражающей способности и увеличению

спектральной ширины. А добавление буферного слоя Мо на две границы раздела одновременно позволило получить уровень отражающей способности выше 70% (рис. 3)

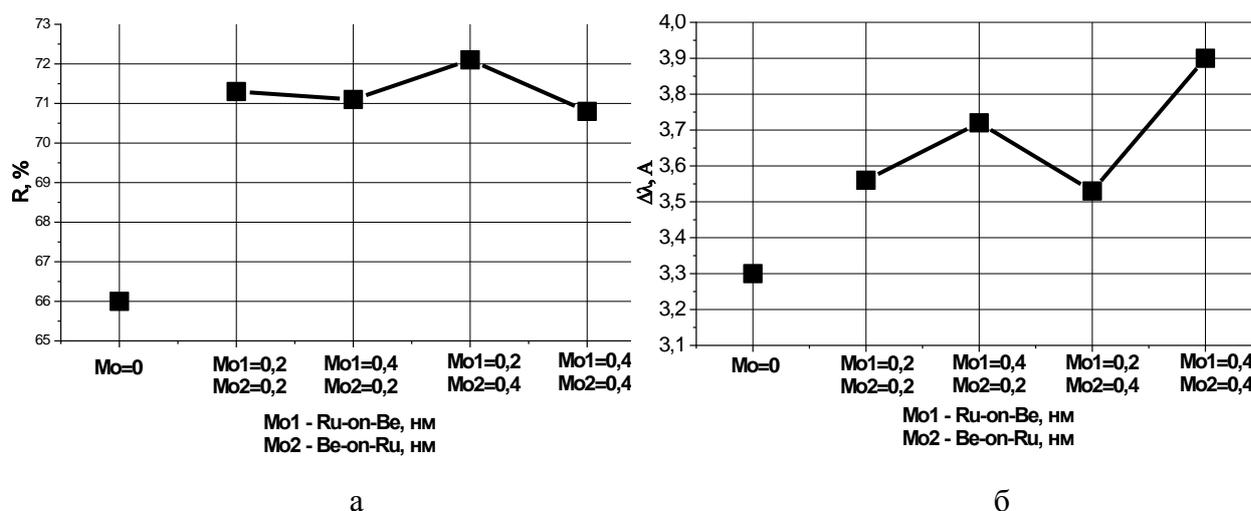


Рисунок 3 - Зависимости коэффициента отражения – а) и спектральной ширины – б) зеркала [Mo/Be/Mo/Ru] на длине волны 11.4 нм от толщины слоев Мо в периоде.

Так, новое рекордное значение отражающей способности удалось получить при толщинах слоя Мо на границах: Ru-на-Be~0,2 нм и Be-на-Ru~0.4 нм. Причиной роста коэффициента отражения является уменьшение длин переходных областей на границах раздела. Физический механизм этого эффекта не установлен. Можно предположить, что молибденовые прослойки являются барьером для образования бериллидов рутения, что повышает оптический контраст на границе.

Третья глава посвящена поиску, синтезу и изучению оптических и физических характеристик многослойных систем, предназначенных для осаждения на поверхность динамической маски – матрицы микрозеркал для безмасочной литографии. Для многослойных рентгеновских зеркал, которые будут осаждаться на поверхность динамической маски вводится существенное ограничение – отсутствие внутренних напряжений в системе, которые могут привести к искажению формы поверхности микрозеркала. Данное ограничение вводится из-за малой толщины микрозеркала, соизмеримой с толщиной отражающего покрытия, и невозможности принять «стандартные» методы компенсации искажения формы поверхности в результате осаждения отражающего покрытия.

Исследованы зависимости коэффициента отражения на длине волны 13,5 нм и внутренних механических напряжений в многослойной системе Mo/Be/Si от толщины кремния. Установлено, что при взаимозамещении Si с Be в многослойной системе сохраняется высокий уровень отражательной способности на уровне R~66%. Это происходит

из-за того, что Be и Si на длине волны 13,5 нм обладают близкими оптическими характеристиками. Однако, при уменьшении толщины Si (увеличении толщины Be) происходит уменьшение сжимающих напряжений в многослойной системе. Нулевые значения внутренних напряжений в системе Mo/Be/Si достигаются при соотношении толщины Si к периоду $t(\text{Si})/d \sim 0,13$, т.е. толщина Si $\sim 0,91$ нм. При дальнейшем уменьшении слоя кремния происходит рост растягивающих напряжений. После осаждения данной структуры на поверхность динамической маски, данная динамическая маска перестала управляться. В результате исследования было установлено, что выход из рабочего состояния происходит из-за электрического замыкания управляющих контактов под микрзеркалами. В этой связи вводится дополнительное требование для отражающего покрытия – высокое электросопротивление материалов многослойной системы.

Изучены характеристики системы Mo/Si изготовленной в разных средах рабочего газа: аргон+азот и аргон+кислород. Установлено, что добавление химически активного газа в среду рабочего газа приводит к ухудшению отражательной способности системы. Добавление азота приводит к увеличению сжимающих напряжений и незначительному увеличению электросопротивления системы. Добавление кислорода приводит к уменьшению сжимающих напряжений и сильному увеличению электросопротивления системы. При этом нулевое значение электросопротивления достигнуто не было.

Изучены характеристики систем $\text{W}_4\text{C}/\text{Si}$ и C/Si , изготовленных в разных рабочих средах. Установлено, что увеличение значения рабочего газа приводит к уменьшению значения напряжений в системе. При этом происходит увеличение количества дефектов в слоях – уменьшение плотности слоев и увеличение шероховатостей переходных границ. Это, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению отражательной способности. При околонулевых значениях внутренних напряжений, данные системы обладают околонулевым значением отражательной способности. Установлено, что добавление водорода в среду рабочего газа приводит к уменьшению значения напряжений в системе. При этом, в Si слое происходит увеличение плотности, а в слоях W_4C и C происходит уменьшение плотности. При изготовлении системы $\text{W}_4\text{C}/\text{Si}$ в среде аргон+водород, на поверхности структуры были обнаружены микрократеры с вырванным веществом (так называемый блистеринг), что не позволяет использовать данную систему в качестве отражающей оптики. Изготовленная система C/Si в среде аргон+водород при соотношении аргон : водород $\sim 1 : 1$ имеет нулевые значения внутренних напряжений и значение отражающей способности на длине волны 13, нм на уровне $R \sim 11\%$. Такое низкое значение отражения связано с большим количеством дефектов, завышенным значением плотности слоя Si и заниженным значением плотности слоя C в структуре.

В четвертой главе изучены свойства поверхности коммерчески доступной матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080pMVSPS600. Определен уровень шероховатости и формы поверхности микрозеркал, который составил $\sigma \sim 2$ нм. Отработана методика нанесения на МЭМС микрозеркал диэлектрических, бесстрессовых многослойных систем, отражающих рентгеновское излучение. На поверхность матрицы микрозеркал осаждено бесстрессовое рентгеновское зеркало C/Si. На рисунке 4.8 а) приведены три последовательно снятые кривые отражения $R(\theta)$ на длине волны $\lambda = 13,5$ нм, а также усредненная кривая (рис. 4 а, сплошная линия) и спектральная зависимость коэффициента отражения (рис. 4 б) от наилучшей структуры C/Si, обеспечивающей минимальное искажение формы микрозеркала.

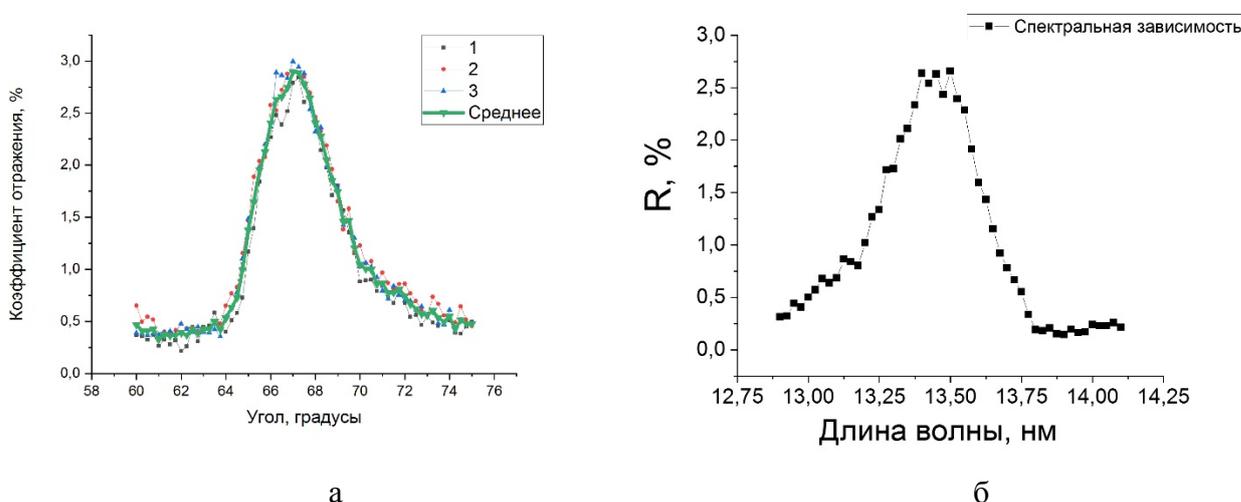


Рисунок 4 – Три последовательных измерения кривой отражения на длине волны 13,5 нм и средняя по трем измерениям (а) и спектральная зависимость коэффициента отражения (б) от МЭМС с C/Si отражающим покрытием.

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:

1. Изучены микроструктура и термическая стойкость рентгеновских зеркал Mo/Be. Длины переходных слоев составили: Mo-on-Be-0,7 нм, Be-on-Mo-0,3 нм. На границе Mo-на-Be образуется химическое соединение с малым содержанием бериллия – MoBe₂. На границе Be-на-Mo образуется химическое соединение с большим содержанием бериллия.

Показана возможность повысить отражающую способность в области 11 нм примерно на 6%, относительно исходного, путем изотермического отжига в течении 1 часа при температуре 300°C

2. Изучены микроструктура и отражательные характеристики в области 11 нм рентгеновских зеркала Ru/Be. Найдены оптимальные толщины слоев, обеспечивающие максимум коэффициента отражения в окрестности 11 нм. Длины переходных слоев составили: Ru-на-Be~1 нм, Be-на-Ru~0.4 нм. Коэффициент отражения на длине волны 11,4 нм 66%, спектральная ширина отражения 0,33 нм.

3. Изучены микроструктура и отражательные характеристики в области 11 нм рентгеновских зеркала Ru/Be с буферными слоями Mo на границах раздела. Коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм составил рекордные 72,1%, спектральная ширина отражения 0,35 нм.

4. Изучены механические напряжения в многослойной системе Mo/Be/Si. Найдены толщины пленок, обеспечивающие одновременно высокие коэффициенты отражения, $R \sim 66-67\%$, на длине волны 13,5 нм и околонулевые механически напряжения. Система выглядит крайне перспективной для изготовления многослойных рентгеновских зеркал для проекционных систем литографов, микроскопов и телескопов дифракционного качества изображений.

5. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики систем C/Si и V_4C/Si , изготовленных при большом значении рабочего давления. Показано, что увеличение рабочего давления приводит к уменьшению плотности материала, уменьшению уровня внутренних напряжений и увеличению шероховатости межслоевых границ, что снизило коэффициент отражения на длине волны 13,5 нм почти до нуля, при околонулевых стрессах.

6. Изучены коэффициенты отражения и физические характеристики систем C/Si и V_4C/Si , изготовленных при добавлении в среду рабочего газа водорода. Показано, что при добавлении водорода у пленок Si происходит увеличение плотности выше табличного значения. Плотность C и V_4C пленок наоборот уменьшается. В системе V_4C/Si из-за добавления водорода в пленках V_4C наблюдается явление накопления водорода в закрытых полостях с последующим «взрывом» с образованием кратеров (блистеринг), которые не позволяют использовать данную структуру в качестве отражающей оптики. Добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении водорода к аргону ~1:1 при синтезе C/Si M3 приводит к уменьшению внутренних напряжений до нулевых 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, ~0.8 от табличного значения,

плотностью рассеивающего слоя С и, наоборот, повышенной плотностью слоев Si, а также большой, ~ 2 нм межслоевой шероховатостью.

7. Получен экспериментальный образец МЭМС, отражающей 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, моделирующей условия реального литографа. Подтверждена реализуемость создания динамической маски для безмасочной рентгеновской литографии.

Список публикаций автора

A1. Р.М. Смертин, 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, M.G. Sertsu, A. Sokolov, Н.И. Чхало, F. Schäfers, П.А. Юнин / Журнал технической физики, 2019, том 89, вып. 11, С 1783-1788,

A2. М.М. Барышева, 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, том 89, вып. 11, С 1763-1769,

A3. Sergey A. Kasatikov, Elena O. Filatova, Sergei S. Sakhonenkov, Aidar U. Gaisin, Vladimir N. Polkovnikov, and Ruslan M. Smertin // Study of Interfaces of Mo/Be Multilayer Mirrors Using X-ray Photoelectron Spectroscopy / J. Phys. Chem . C 2019, 123, 25747–25755

A4. 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. // Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн / Поверхность Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020, №2, С. 3-14,

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

A6. Полковников В.Н., Гарахин С.А., Квашенников Д.С., Малышев И.В., Салащенко Н.Н., Свечников М.В., Смертин Р.М., Чхало Н.И. // Многослойные зеркала Cr/Sc с улучшенным отражением для диапазона "окна прозрачности воды" / Журнал технической физики, 2020, том 90, вып. 11, С 1893-1897,

A7. 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, // Quantum

Confinement Effect in Nanoscale Mo/Si Multilayer Structure / J. Phys. Chem. C (under Revision), 2020, C 124, P 17795-17805,

A8. 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 // Phase-microstructure of Mo/Si nanoscale multilayer and intermetallic compound formation in interfaces // Intermetallics, 2020, 125, 106872.

A9. Elena O. Filatova, Sergei S. Sakhonenkov, Sergey A. Kasatnikov, Aidar U. Gaisin, Elizaveta S. Fateeva, Ruslan M. Smertin, and Vladimir N. Polkovnikov // Effect of Insertion of B4C at the Interface Mo/Be Depending on the Film Order / J. Phys. Chem. C, 2020, 124, 41, 22601–22609

A10. N. Kumar, Vladimir A. Volodin, Ruslan M. Smertin, Pavel A. Yunin, Vladimir N. Polkovnikov, Kalpataru Panda, Andrey N. Nechay,¹ and Nikolay I. Chkhalo // Raman scattering study of nanoscale Mo/Si and Mo/Be periodic multilayer structures / J. Vac. Sci. Technol., 2020, A 38, 063408

A11. N. Kumar, A.T. Kozakov, R.M. Smertin, V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, A.V. Nikolskii, A.A. Scrjabin // X-ray photoelectron studies of near surface oxidation and plasmon excitation in spatially confined bi- and tri- layers periodic multilayer mirrors / Thin Solid Films, 2021, 717, 138449

A12. A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov // Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements / Precision Engineering, 2021, V.69, P. 29-35

A13. Niranjana Kumar, Aleksey V. Nezhdanov, Sergey A. Garakhin, Ruslan M. Smertin, Pavel A. Yunin, Vladimir N. Polkovnikov, Nikolay I. Chkhalo, Aleksandr I. Mashin // Investigation of transverse optical phonon of thin Si films embedded in periodic Mo/Si and W/Si multilayer mirrors / Surfaces and Interfaces, 2021, T. 25, C. 101270.

A14. 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, and E. A. Vishnyakov // Broadband normal-incidence mirrors for a range of 111–138 Å based on an a-periodic Mo/Be multilayer structure / Optical Materials Express, 2021, Vol. 11, Issue 9, pp. 3038-3048

A15. A. В. Водопьянов, С. А. Гарахин, И. Г. Забродин, С. Ю. Зуев, А. Я. Лопатин, А. Н. Нечай, А. Е. Пестов, А. А. Перекалов, Р. С. Плешков, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашенко, Р. М. Смертин, Б. А. Уласевич, Н. И. Чхало // Измерения абсолютных интенсивностей спектральных линий ионов Кг, Аг и О в диапазоне длин волн 10–18 нм при импульсном лазерном возбуждении / Квантовая электроника, 2021, 51(8), 700-707.

A16. Niranjana Kumar, Aleksey Nezhdanov, Ruslan Smertin, Vladimir Polkovnikov, Nikolai I. Chkhalo, Vladimir Golyashov and Oleg Tereshchenko // Volume plasmon blueshift in dimensionally thin beryllium and silicon films embedded within Be/Si periodic multilayer mirrors / Phys. Chem. Chem. Phys., 2022, Accepted Manuscript

Материалы конференций и тезисы докладов с участием автора

B1. Смертин, Р.М. Влияние термического отжига на свойства многослойных зеркал Mo/Be / Р.М. Смертин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, М.Г. Сертсу, А. Sokolov, Н.И. Чхало, F. Schafers, П.А. Юнин // Материалы XXIII симпозиума, г. Нижний Новгород. - 2019. - С.525-526.

B2. В.Н. Полковников, Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, Д.С. Квашенников, И.В. Малышев, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало, Достижения и направления развития многослойной оптики на основе Cr/Sc, Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопластика и нанопластика». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С. 897-898

B3. С.С. Сахоненков, С.А. Касатиков, А.У. Гайсин, В.Н. Полковников, Р.М. Смертин, Е.О. Филатова, Механизм формирования межслоевой области в многослойной структуре Mo/(B4C)/Be, Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопластика и нанопластика». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С. 907-908

B4. М.В. Свечников, С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало, Эффективность резонансных многослойных мишеней в качестве источников ЭУФ излучения, Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопластика и нанопластика». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С. 909

B5. Р.М. Смертин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало, Бесстрессовые высокоотражающие многослойные зеркала на длину волны 13.5 нм, Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопластика и нанопластика». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С. 914-915

B6. Р.М. Смертин, В.Н. Полковников, А.Л. Тригуб, Н.И. Чхало, П.А. Юнин, С.Н. Якунин, Структура переходных слоев в многослойных зеркалах Mo/Be, Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопластика и нанопластика». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С. 916-917

B7. Н.И. Чхало, М.М. Барышева, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, М.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Р.М. Смертин, М.Н. Торопов / Состояние дел и перспективы развития безмасочной нанолитографии на длине волны 13.5 нм, Материалы

XXIV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. 2020. Т.2. С.924-925

B8. 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. / Properties of quantum mechanically confined Si layer in Mo/Si multilayer Nanofilms // Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. – 2020. – Т.2. – С. 831

B9. 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. Салашенко, Р.М. Смертин, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало / Спектрометр для исследования эмиссионных спектров лазерной плазмы в ЭУФ диапазоне с абсолютно калиброванным детектором / Материалы XXV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. 2021. Т.1, 379-380

B10. И.С. Дубинин, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, Н.Н. Цыбин, А.Я. Лопатин, Р.М. Смертин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало / Расчет, синтез и изучение свойств зеркал со спектральной полосой пропускания, совпадающей с эмиссионными линиями Si, Be, В, Хе, Кг / Материалы XXV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. 2021. Т.1, 397-398

B11. Р.М. Смертин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, М.В. Свечников, Н.И. Чхало / Изучение влияния барьерных и аморфизирующих слоев на профиль диэлектрической проницаемости и межслоевую шероховатость в многослойных зеркалах Ru/Be / Материалы XXV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. 2021. Т.1, 454-455

B12. Niranjana Kumar, Alexey T. Kozakov, Alexey V. Nezhdanov, Vladimir N. Polkovnikov, Ruslan M. Smertin, Roman S. Pleshkov, Nikolay I. Chkhalo / Плазмонное возбуждение кристаллических нанокластеров в многослойных зеркалах, работающих в ЭУФ и рентгеновской области длин волн // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 362

B13. С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Р.М. Смертин, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало «Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6,6-32 нм мишени из нержавеющей стали при импульсном лазерном возбуждении» Тезисы докладов объединённой конференции "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике", 2021 год, стр. 289-290.

B14. С. А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Р.М. Смертин, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало / Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в

диапазоне длин волн 3-32 нм мишени из углерода при импульсном лазерном возбуждении / Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. 2022. Т.1, 531-532

В15. Р.М. Смертин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало / Изучение влияния барьерных слоев межслоевую шероховатость в многослойных зеркалах Ru/Be / Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. 2022. Т.1, 608-609

Список литературы

1. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscannxe%203400b>
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. N. I. Chkhalo, S. Kunstner, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, F. Sch'afers, and S. D. Starikov. Appl. Phys. Lett. 102, 011602 (2013)
5. D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E van de Kruijs, E. Louis, and F. Bijkerk. Opt. Lett. 40(16), 3776 (2015).
6. S. S. Churilov, R. R. Kildiyarova, A. N. Ryabtsev, and S. V. Sadovsky. Phys. Scr. 80, 045303 (2009)
7. N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. AIP Advances. 3(8), 082130 (2013).
8. <http://elcompbase.ru/news/38/>
9. Isabelle Servin, Patricia Pimenta-Barros, Arthur Bernadac, Jonathan Pradelles, Allan Germain, Yoann Blancquaert, Philippe Essomba, Stefan Landis, Gerard ten Berge, Marco Wieland, Philippe Brun / "Process development of a maskless N40 via level for security application with multibeam lithography," / Proc. SPIE 10584, Novel Patterning Technologies 2018, 1058411
10. N. Choksi et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. V. 17, P. 3047 (1999).
11. Chkhalo N., Polkovnikov V., Salashchenko N., and Toropov M. Deposition of Mo/Si multilayers onto MEMS micromirrors and its utilization for extreme ultraviolet maskless lithography // J. Vac. Sci. Technol. B – 2017. – Vol. 35. – P. 062002.
12. Chkhalo N. I., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Toropov M. N. Problems and prospects of maskless (B)EUV lithography // Proc. of SPIE – 2016. – Vol. 10224. – P. 102241O.

13. Chen Y., and Shroff Y. The effects of wafer-scan induced image blur on CD control, image slope and process window in maskless lithography // Proc. of SPIE – 2006. – Vol. 6151. – P. 61512D.
14. Ito T., Okazaki S. Pushing the limits of lithography // Nature – 2000. – Vol. 406. – P. 1027-1031.
15. Klein C., Platzgummer E., Klikovits J., et al. / PML2: the maskless multibeam solution for the 22 nm node and beyond // Proc. of SPIE – 2009. – Vol. 7271. – P. 72710N.
16. Watanabe H., and Higashikava I. Mask cost and specification // Proc. of SPIE – 2003. – Vol. 5256. – P. 423-430.
17. Kim S.-S., Chalykh R., Kim H., et al. Progress in EUV lithography toward manufacturing // Proc. of SPIE – 2017. – Vol. 10143. – P. 1014306.
18. <https://news.samsung.com/global/samsung-announces-industrys-first-euv-dram-with-shipment-of-first-million-modules>
19. https://www.tsmc.com/uploadfile/pr/newspdf/THHIHIPGTH/NEWS_FILE_EN.pdf
20. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscan-nxe3400b>
21. Saa Bajt, Ricke D. Behymer, Paul B. Mirkarimi, Claude Montcalm, Mark A. Wall / Experimental investigation of beryllium-based multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography / SPIE Vol. 3767, 1999, pp 259-270
22. Svechnikov M.V., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Tatarskiy D.A., Salashchenko N.N., Schäfers F., Sertsu M.G. Sokolov A., Vainer Y.A., and Zorina M.V. // Optics Express. 2018. V. 26. Iss. 26. pp. 33718-33731
23. Nechay A. N., Chkhalo N. I., Drozdov M. N., Garakhin S. A., Pariev D. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Svechnikov M. V., Vainer Yu. A., Meltchakov E., and Delmotte F.// AIP Advances. 2018. V. 8, P 075202.