

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Санкт-Петербургский

государственный университет

С. В. Микушев

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Смертина Руслана Маратовича на тему «МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ БЕЗМАСОЧНОЙ И ПРОЕКЦИОННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИТОГРАФИИ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Смертина Р.М. представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики». Диссертация посвящена поиску и исследованию новых композиций многослойных рентгеновских зеркал (электрически-непроводящих, без внутренних механических напряжений) на основе бериллия, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения в окрестности длины волны 11 нм для безмасочной рентгеновской литографии, и, несомненно, является **важным и актуальным** научным трудом. Работа затрагивает ряд ключевых вопросов, связанных с разработкой новых многослойных функциональных покрытий, которые обладают высокой отражательной способностью, долговременной стабильностью и работоспособностью, а также радиационной стойкостью в том числе в качестве покрытий динамической маски на базе коммерчески доступных

микроэлектромеханических систем (МЭМС) микрозеркал отражающих рентгеновское излучение с длиной волны в окрестности 13.5 нм. Представленные в диссертации результаты имеют высокую значимость как для фундаментальной науки, так и для практических применений.

Актуальность темы исследования

Рентгеновская оптика является одной из ключевых технологий в различных научных, инженерных и промышленных приложениях, среди которых одним из наиболее важных является литография следующего поколения. Из-за высокой стоимости оборудования, дороговизны и одновременно необходимости использования большого числа масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры, проекционная фотолитография становится конкурентоспособной только при массовом производстве. ЭУФ-литография требует еще больших затрат, тем не менее, начиная с топологических размеров от 16 нм она существенно дешевле, чем традиционная фотолитография. Поиск альтернативных методов литографии, способных создавать нанометровые структуры при меньших затратах, независимо от объемов производства становится крайне **актуальной задачей**. Одним из перспективных кандидатов на эту роль является безмасочная рентгеновская литография. Ключевой проблемой, препятствующей развитию данной технологии, является отсутствие работоспособных МЭМС, отражающих рентгеновское излучение, что подтверждает актуальность темы диссертационных исследований.

Новизна представленного исследования заключается в детальном анализе роли ряда важных факторов, влияющих на отражательную способность многослойных структур, и установлении закономерностей, позволивших автору предложить перспективные многослойные рентгеновские структуры, для проекционных систем литографов, микроскопов и телескопов, обеспечивающих дифракционное качество изображений. В частности, автор впервые детально изучил влияние давления аргона, а также содержания химически активных газов (кислорода и азота) в

среде рабочего газа аргона на физические характеристики (плотность материала, внутренние напряжения, шероховатость) систем Mo/Si, C/Si и B₄C/Si а также на их отражательную способность на длине волны 13,5 нм. Впервые показано, что добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 при синтезе позволяет получить бесстрессовую и диэлектрическую систему C/Si, обеспечивающую на длине волны 13.5 нм коэффициент отражения R=11 %, что представляет интерес для безмасочной рентгеновской литографии. Впервые продемонстрирована возможность создания пространственно-временного модулятора рентгеновского излучения с помощью коммерчески доступной МЭМС микрозеркал.

Диссертационная работа включает Список сокращений, Введение, 4 главы, Заключение, Список литературы, Список работ автора по теме диссертации.

Во **введении** автором убедительно обоснована актуальность выбранной темы, что подтверждается четким выделением научной новизны работы и значимости полученных результатов для дальнейшего развития области. Сформулированы цели и задачи исследования, которые последовательно раскрываются в каждой из глав, а также указаны ключевые положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой всестороннее рассмотрение проблем проекционной рентгеновской литографии и возможные пути их решения. Детально рассмотрены методики, использованные в рамках исследования, что свидетельствует о высоком уровне экспериментальной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям Mo/Wc и Ru/Wc многослойных зеркал для области длин волн 11 нм. На основе проведенного комплексного исследования (методами рентгеновской рефлектометрии, XANES, EXAFS и РФЭС) динамики формирования протяженности и стресса интерфейсов в зависимости от толщины слоев Mo и времени вакуумного отжига автором установлено формирование

асимметричной границы раздела в системе Mo/Be с образованием бериллидов молибдена разной стехиометрии. Впервые детально изучено возникновение внутренних напряжений в многослойной системе Be/Ru в зависимости от параметра γ , а также от границы введения Mo буферного слоя и его толщины. Установлено значение параметра γ , толщина буферного слоя и порядка его напыления, обеспечивающие нулевые напряжения в системе. Впервые автором получен рекордный коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм, который составил $R=72.2\%$ при $\Delta\lambda=0.38$ нм. Автором получены важные практические результаты: 1) возможность повышения коэффициента отражения системы на длине волны 11.4 нм, вблизи нормального падения путем изотермического вакуумного отжига; 2) введение буферного слоя Mo в многослойного зеркала Be/Ru на длине волны 11.4 нм позволяет достичь стабильности его отражательной способности в течении минимум двух лет; ;) показано, что оптическая эффективность 12-ти зеркальной литографической установки на основе МРЗ Ru/Be на длине волны 11.2 нм на 36% выше, чем у установки на основе МРЗ Mo/Si на длине волны 13.5 нм.

Третья глава посвящена поиску, синтезу и изучению оптических и физических характеристик многослойных рентгеновских зеркал, предназначенных для осаждения на поверхность динамической маски – матрицы микрозеркал для безмасочной рентгеновской литографии. Проведено исследование влияния давления аргона, а также содержания химически активных газов (кислорода и азота) в среде рабочего газа аргона на физические характеристики (плотность материала, внутренние напряжения, шероховатость) систем Mo/Si, C/Si и B₄C/Si а также на их отражательную способность на длине волны 13,5 нм. Впервые показано, что добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 при синтезе позволяет получить бесстрессовую и диэлектрическую систему C/Si, обеспечивающую на длине волны 13.5 нм

коэффициент отражения $R=11\%$, что представляет интерес для безмасочной рентгеновской литографии.

В четвертой главе изучены свойства коммерчески доступной матрицы микрозеркал. Отработана методика нанесения на МЭМС микрозеркал диэлектрических, бесстрессовых МРЗ C/Si, отражающих рентгеновское излучение на длине волны 13.5 нм. Показана долговременная стабильность и радиационная стойкость к облучению излучением МЭМС микрозеркал с отражающим C/Si покрытием, что обеспечивает ее использование в составе безмасочного рентгеновского литографа на 13.5 нм.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Текст диссертации изложен на 139 печатных страницах, содержит 86 наименований библиографии, 53 рисунка и 18 таблиц. Оформление диссертационной работы не вызывает нареканий. Работа хорошо структурирована, достаточно полно проиллюстрирована, материал диссертации изложен грамотно, ясно и последовательно. Имеются незначительные опечатки, которые не портят положительного впечатления от работы.

Среди наиболее важных новых **фундаментальных научных результатов** диссертационной работы отметим следующие:

1) На основе проведенного комплексного исследования динамики формирования протяженности и строения интерфейсов в зависимости от толщины слоев Mo и времени вакуумного отжига установлено формирование асимметричной границы раздела в системе Mo/Be с образованием бериллидов молибдена разной стехиометрии. Впервые продемонстрирована возможность повышения коэффициента отражения системы на длине волны 11.4 нм, вблизи нормального падения путем изотермического вакуумного отжига.

2) Впервые детально изучено возникновение внутренних напряжений в многослойной системе Be/Ru в зависимости от параметра γ , а также от

границы введения Мо буферного слоя и его толщины. Установлено значение параметра γ , толщина буферного слоя и порядка его напыления, обеспечивающие нулевые напряжения в системе. Получен рекордный коэффициент отражения на длине волны 11.4 нм, который составил $R=72.2\%$ при $\Delta\lambda=0.38$ нм.

3) На основе тщательного анализа материалов и соотношения толщин их слоев составлена оптимальная комбинация отражающего покрытия Mo/Be/Si в бесстрессовом состоянии для рабочей длины волны 13.5 нм.

4) Изучено влияние среды, в которой изготавливалась многослойная система (разные значения рабочего давления аргона, смесь аргона и химически активного газа кислорода, добавление водорода в среду рабочего газа) на коэффициенты отражения и физические характеристики МРЗ и показано, что добавление водорода в среду рабочего газа в соотношении аргона к водороду в диапазоне 1:0.75 – 1:1.2 позволяет синтезировать бесстрессовую и диэлектрическую систему C/Si, обеспечивающую на длине волны 13.5 нм коэффициент отражения $R=11\%$, что представляет интерес для безмасочной рентгеновской литографии.

5) Показана долговременная стабильность и радиационная стойкость к облучению излучением МЭМС микрозеркал с отражающим C/Si покрытием, что обеспечивает ее использование в составе безмасочного рентгеновского литографа на 13.5 нм.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в убедительной демонстрации возможности создания высокоэффективных МРЗ для литографических установок на длине волны в окрестности 11 нм. Переход на более короткую рабочую длину волны позволит увеличить разрешающую способность литографического процесса. Также получены бесстрессовые высокоотражающее МРЗ Mo/Be/Si и диэлектрическое МРЗ C/Si, оптимизированное для длины волны 13.5 нм, которые представляют интерес для оптики дифракционного качества и для безмасочной рентгеновской литографии, соответственно.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Достоверность результатов экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертационной работы Р.М. Смертина, обеспечивается применением современных экспериментальных методов исследования с использованием высокоточной измерительной техники, а также разнообразием применяемых исследовательских методов, подтверждающих полученные результаты. Также, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением полученных экспериментальных данных с расчетными значениями. Результаты диссертации получили широкую апробацию на основе публикаций в высокорейтинговых российских и международных журналах и в материалах профильных Международных конференций.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и соответствует требованиям ВАК.

При общей положительной оценке работы имеются следующие замечания:

1. В системе Mo/Be отмечается формирование MoBe_2 на границе Mo-на-Be вследствие взаимного перемешивания слоёв. На противоположной границе (Be-на-Mo) предполагается формирование MoBe_{12} либо MoBe_{22} , однозначная идентификация оказалась затруднительной. Рассматривался ли вариант и возможно ли такое, что на данной границе формируется смесь из упомянутых фаз бериллидов молибдена, а не какой-то один конкретный бериллид?
2. В подразделе 2.1 представлены результаты РФЭС-анализа для системы Mo/Be. Однако для более глубокого понимания получаемой картины и оценки достоверности полученных выводов требуется дополнительная информация о параметрах экспериментальной установки: энергии возбуждающих фотонов, энергетическом разрешении монохроматора или теоретических расчётов проводилась идентификация спектральных линий.

Также вызывает интерес обоснование выбора числа компонент при разложении спектров.

3. Описание процедур подгонки кривых отражения требует более детализированного изложения используемых теоретических моделей. В частности, не указано, учитывалось ли появление на поверхности слоев естественных оксидов или адсорбированных углеродсодержащих загрязнений, а также каким образом задавались значения плотностей или оптических констант отдельных слоёв. Был ли учтён возможный дрейф толщин по глубине многослойной структуры?

Отдельного пояснения требует интерпретация изменения ширины переходных слоёв при введении буферных прослоек. Например, для системы Ru/Be указано, что переходный слой Ru-на-Be имеет протяженность 0.9-1.0 нм (параметр s), а после добавления буферной прослойки Mo толщиной 0.2 нм уменьшается до 0.8 нм. В указанную толщину входит $s(\text{Mo-на-Be}) + t(\text{Mo}) + s(\text{Ru-на-Mo})$ или оценка проводится несколько иным образом?

4. В подразделе 2.3 приведены сравнения эффективностей отражательных частей оптической схемы литографа, построенных на длинах волн 13.5 нм (Mo/Si) и 11.2 нм (Mo/Be и Ru/Be). Указывается, что эффективность Ru/Be существенно выше, чем у Mo/Si. Однако было бы полезно привести значения эффективностей излучения ксенонового и оловянного источников, а также численно сравнить интенсивности излучения после прохождения оптических схем. Часть, связанную с потерей интенсивности излучения после прохождения фильтров можно либо опустить, либо грубо оценить.

5. В подразделе 3.1.2 приводятся результаты рентгенофлуорисцентного анализа поверхности динамической маски в разных координатах, однако полученные спектры не приведены, что не позволяет убедиться в достоверности выводов об элементном составе.

6. В тексте диссертации не указано, каким способом определялись плотности тонких слоев C, B₄C, Si и Mo после добавления в структуру атомов N, O или H.

7. Не хватает небольшого комментария по физическому механизму образования микрократеров на поверхности некоторых многослойных покрытий после добавления водорода.

Высказанные замечания не затрагивают основные положения диссертации, не умаляют ее достоинств и не влияют на общую положительную оценку всей работы.

Заключение

Диссертационное исследование Смертина Руслана Маратовича является законченным научным исследованием, которое содержит новое решение ряда важных задач, связанных с поиском и исследованием новых композиций многослойных рентгеновских зеркал на основе бериллия (электрически-непроводящих, без внутренних механических напряжений), обеспечивающих высокие коэффициенты отражения в окрестности длины волны 11 нм для безмасочной рентгеновской литографии и имеет существенное фундаментальное и практическое значение для развития технологии безмасочной рентгеновской литографии. Работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Руслан Маратович Смертин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры электроники твёрдого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Павлычевым Андреем Алексеевичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Кафедры электроники твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 02.09.2025, протокол № 44/12/16-02-103.

Согласны на обработку персональных данных при размещении отзыва в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

И.О. заведующего Кафедрой электроники твёрдого тела СПбГУ
доктор физико-математических наук,
профессор,



Е.О. Филатова

Доктор физико-математических наук,
профессор,
профессор Кафедры электроники
твёрдого тела СПбГУ



А.А. Павлычев

Подписи заверяю:

И.о. начальника
отдела кадров № 3
И.И. Константинова

кадр
02.09.2025



Сведения о ведущей организации

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

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.

Телефон (812) 328-97-01, e-mail: spbu@spbu.ru