

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 02.10.2025 № 7

О присуждении Смертину Руслану Маратовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики – принята к защите 26 июня 2025 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Смертин Руслан Маратович, 1993 года рождения, в 2018 году окончил обучение в Национальном техническом университете «Харьковском политехническом институте», г. Харьков, Украина, по специальности 132 «Материаловедение», образовательная программа «Физическое материаловедение», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В.

Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН) (срок обучения 01.09.2018 – 31.08.2022), работает в должности младшего научного сотрудника ИФМ РАН.

Диссертация выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН.

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

Официальные оппоненты:

1. Горай Леонид Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН».

2. Кузин Сергей Вадимович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 4.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт солнечно-земной физики СО РАН».

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном и.о. заведующего Кафедрой электроники твердого тела СПбГУ, доктором физико-математических наук, профессором Филатовой Еленой Олеговной, профессором Кафедры электроники твердого тела СПбГУ, доктором физико-математических наук Павлычевым Андреем Алексеевичем, и утвержденном И.О. начальника отдела кадров №3, Константиновой Ириной Ивановной, указала, что к наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие:

1. На основе проведенного комплексного исследования динамики формирования протяженности и строения интерфейсов в зависимости от толщины слоев Мо и времени вакуумного отжига установлено формирование асимметричной границы раздела в системе Мо/Ве 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 Mo 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.

В конце отзыва делается заключение, что диссертация Смертина Руслана Маратовича 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.

Соискатель по теме диссертации имеет 19 опубликованных работ в

рецензируемых научных журналах, 5 из которых приведены ниже:

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

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

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

4. 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.

5. 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.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**все положительные**):

1) Ершов Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.10: – «Физика полупроводников и диэлектриков», доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского в отзыве на автореферат диссертации отмечает, что диссертационная работа соответствует паспорту специальности и

требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с последующими изменениями), а ее автор, Руслан Маратович Смертин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2– Приборы и методы экспериментальной физики. В качестве **замечания** было отмечено отсутствие в тексте автореферата объяснения или обсуждения причины разницы временной деградации между многослойными рентгеновскими зеркалами Ru/Be и МРЗ Mo/Ru/Mo/Be.

2) Пунегов Василий Ильич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», профессор, главный научный сотрудник Физико-математического института ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», отмечает что диссертационная работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, а ее автор Р. М. Смертин, несомненно, заслуживает учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

3) Рагозин Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», профессор, главный научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, отмечает что это замечательная работа, в полной мере удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Р. М. Смертин заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики. В отзыве присутствуют следующие **замечания**: 1) Следовало бы пояснить, что понимается под ‘пиковым’ и ‘интегральным’ коэффициентами отражения МЭМС; 2) Вызывает вопрос и требует пояснения утверждение “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.”

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их

научных исследований, посвященных рентгеновской оптике, и, в частности, изучению многослойных рентгеновских зеркал (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Кузин С В. – более 10 публикаций, оппонент Горай Л. И. – более 10 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, в результате выполненных соискателем исследований:

Экспериментально показана возможность создания высокоэффективных многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) для литографических установок на длине волны в окрестности 11 нм. **Экспериментально получено** рекордное значение коэффициента отражения $R=72,2\%$ зеркала на основе Ru/Be на длине волны 11,4 нм. Переход на эту рабочую длину волны позволит увеличить разрешающую способность литографического процесса. **Продемонстрировано** бесстрессовое высокоотражающее зеркало Ru/Be для работы на длине волны в окрестности 11 нм с высоким, на уровне 71%, коэффициентом отражения, которое представляет интерес для оптики дифракционного качества.

Разработано и создано бесстрессовое высокоотражающее зеркало Mo/Be/Si, оптимизированное для работы на длине волны 13,5 нм с высоким коэффициентом отражения ($R\sim 67\%$), которая представляет интерес для оптики дифракционного качества в окрестности длины волны 13,5 нм.

Экспериментально получено бесстрессовое диэлектрическое зеркало C/Si, обладающее 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.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

Созданные высокоотражающие зеркала на основе Ru/Be могут быть использованы для создания оптических элементов для литографии нового поколения на длине волны в окрестности 11 нм.

Полученные данные о внутренней микроструктуре зеркал Mo/Be могут быть использованы для более точного прогнозирования рентгенооптических характеристик в широком диапазоне длин волн. Найденная зависимость изменения коэффициента отражения в результате изотермического вакуумного отжига может позволить получить новые рекордные коэффициенты отражения в окрестности длины волны 11 нм.

Полученное бесстрессовое и высокоотражающее зеркало Mo/Be/Si может быть использовано для создания литографов, микроскопов и телескопов, обеспечивающих дифракционное качество изображений.

Разработанная технология создания динамической маски, отражающей излучение с длиной волны 13,5 нм, может быть использована для создания прототипа проекционного безмасочного литографа с рабочей длиной волны 13,5 нм.

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием современного технологического и измерительного оборудования, а также адекватным выбором использованных подходов. Научные положения диссертации не противоречат экспериментальным результатам и теоретическим моделям других научных групп. Полученные результаты опубликованы в реферируемых журналах и доложены на ряде международных конференций.

Личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию:

1. Изготовление всех экспериментальных образцов пленок материалов и многослойных рентгеновских зеркал выполнялись автором самостоятельно.
2. Изучение структурных параметров пленок и многослойных зеркал по данным рентгеновской рефлектометрии выполнялись автором самостоятельно.
3. Определение значений внутренних напряжений и оптическим и интерферометрическим методами выполнялись автором самостоятельно.
4. Равнозначный вклад в анализе структур методом рентгеновского фазового анализа. Экспериментальные измерения проводил Юнин П. А.

5. Равнозначный вклад в анализе структур методом вторичной ионной масс-спектрометрии. Экспериментальные измерения проводил Дроздов М. Н.

6. Равнозначный вклад в анализе структур методом EXAFS спектроскопии. Экспериментальные измерения проводил Тригуб А. Л. («Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт"», Москва, Россия)

7. Равнозначный вклад в элементном анализе МЭМС микрозеркал. Экспериментальные измерения проводил Гусев С. А.

В ходе защиты диссертации официальный оппонент Л. И. Горай высказал следующее замечание:

На стр. 13, Положение 2, выносимое на защиту: «Отражательные характеристики МРЗ Ru/Be ограничены широкими переходными границами раздела (Ru-на-Be~1 нм, Be-на-Ru~0,4 нм) и перемешиванием материалов слоев между собой. Внедрение буферных слоев Мо на границы раздела приводит к меньшему перемешиванию слоев системы между собой и уменьшению ширины переходной границы Ru-на-Be до 0,8 нм, что позволило получить рекордный коэффициент отражения ($R=72,2\%$). МРЗ Мо/Ru/Мо/Be обладает временной стабильностью коэффициента отражения и околонулевыми механическими внутренними напряжениями». За счет внедрения тонких Мо слоев на границах многослойки удалось уменьшить перемешивание материалов и получить очень высокий коэффициент отражения. Однако, он все равно на $\sim 5\%$ меньше теоретически достижимого. Этот рекордный коэффициент был получен на длине волны 11,4 нм. Вопрос - будет ли он выше на 11,2 нм и, если «да», то на сколько? За счет чего можно еще больше приблизиться к теоретическому пределу? Очевидно, измерения были сделаны на небольшом по размеру образце, а какова будет однородность (в %) при изготовлении крупногабаритного Мо/Ru/Мо/Be МРЗ и упадет ли средний по апертуре коэффициент отражения?

Соискатель Смертин Р.М. в своём ответе сообщил, что:

Да, на длине волны 11,2 нм коэффициент отражения будет больше. При нормальном падении ожидается $R=73,8\%$.

Возможно, использовать другие методы интерфейс-инженерии – другие буферные слои на границах раздела; ионное ассистирование и другое. Возможно,

удастся повысить коэффициент отражения при термическом отжиге, как это случилось с МРЗ Мо/Ве.

Все МРЗ изготавливаются методом магнетронного осаждения на специализированной установке, которая позволяет осаждать покрытие на подложки большого размера. Максимальное отклонение (неоднородность) периода МРЗ по всей площади большой подложки не превышает 0,2-0,5% (зависит от конкретной задачи и требований ТЗ). Такое отклонение не приведет к значительному изменению среднего коэффициента отражения от всей площади подложки.

Официальный оппонент С.В. Кузин высказал следующее замечание:

В главе 1 приведен обзор МРЗ для литографических установок на 11,2 нм, в то время как 2-я глава посвящена оптимизация зеркал на 11,4 нм. Из текста непонятно, чем обусловлено такое изменение рабочей длины волны, и на сколько оно является критичным с точки зрения проекционной ЭУФ литографии.

Соискатель Смертин Р.М. в своём ответе сообщил, что:

11,2 нм – длина волны литографии «нового» поколения. Максимально близко к краю поглощения Ве. Эта длина волны выбирается из соотношения максимального интегрального коэффициента отражения МРЗ и сохранения максимума излучения источника

11,4 нм – длина волны, на которой проводилось измерение на лабораторных рефлектометрах (Ве К α линия)

На заседании 02.10.2025 г. диссертационный совет, за проведённые экспериментальные исследования и создание многослойных рентгеновских зеркал с рекордными отражательными характеристиками на длине волны 11,2 нм и за исследование и изготовление первого в мире образца динамической маски, отражающей излучение с длиной волны 13,5 нм, принял решение присудить Смертину Руслану Маратовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики),

участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0 (нет).

Председатель диссертационного совета

Красильник З. Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д. Ю.

Дата оформления Заключения 02.10.2025 г.