

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Смертина Руслана Маратовича «Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Прогресс в развитии большинства современных технологий и устройств, использующих электронные компоненты, в первую очередь связан с достижениями в области литографии. В настоящее время созданы промышленные образцы литографов, на которых достигим топологический размер менее 20 нм и которые имеют производительность, обеспечивающую рентабельность их эксплуатации. Прогресс в уменьшении топологического размера достигается различными методами, но наиболее перспективный на современном этапе – использование технологии проекционной литографии в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне спектра. Современные проекционные литографы работают с излучением 13.5 нм, что позволяет достигать разрешения в 13 нм. Один из путей увеличения разрешения литографических установок и связанный с этим переход на меньший топологический размер возможен при использовании еще более коротковолнового излучения без существенного ухудшения светоэнергетических свойств.

Другая проблема, связанная с использованием литографии – снижение себестоимости мелкосерийных электронных компонент. Рентабельность их выпуска при проекционной литографии в значительной мере определяется стоимостью маски. Альтернативный метод многопучковой электронной литографии имеет ограничение по величине топологического размера. По этой причине перспективным представляется использование безмасочной рентгеновской проекционной литографии (БМЛР), где функцию маски выполняет микро-электро-механическая система (МЭМС) микрозеркал. Несмотря на существенно более низкую производительность БМЛР с ее помощью можно принципиально уменьшить стоимость выпускаемых изделий.

Диссертационная работа Р.М. Смертина направлена на решение задач, связанных с разработкой и исследованием свойств многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) для проекционной ЭУФ литографии на длину волны 11.2 нм, и МРЗ на длину волны 13.5 для использования в БМЛР. В связи с этим работа является своевременной и актуальной. Работа выполнялась автором в ИФМ РАН.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведена научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражено личное участие автора, представлена апробация полученных результатов.

В первой главе представлен обзор современного состояния промышленной ЭУФ литографии и обозначена ниша использования БМЛР. Приводится сравнение характеристик рентгенооптических характеристик МРЗ Mo/Be, Ru/Be и Mo/Si, как кандидатов на использование в литографических установках с длиной волны 11.2 нм, и МРЗ на основе систем Mo/Si, как кандидатов для длин волн 13.5 нм. Для последнего типа МРЗ рассмотрен вопрос внутренних напряжений их отражающих покрытий и методы его устранения. В этой главе довольно подробно описана магнетронная установка для синтеза многослойных структур, а также система аттестации полученных МРЗ различными методами. Особое внимание уделено методам измерения напряжений в синтезированных многослойных структурах, приведена оценка точности измерений напряжений.

Вторая глава посвящена исследованию свойств синтезированных МРЗ Mo/Be, Ru/Be и Ru/Be с буферными слоями Mo, оптимизированных для диапазона 11.4 нм. Исследовались их рентгенооптические характеристики, термостойкость, временная стабильность. Различными методами была исследована структура переходных слоев. Для серии МРЗ Ru/Be и Ru/Be с буферными слоями Mo исследовались внутренние напряжения покрытий. Была проведена работа по достижению максимального коэффициента отражения МРЗ в рабочем диапазоне при минимизации внутренних напряжений путем подбора положения и толщины буферного слоя Mo. При этом были достигнуты пиковые значения коэффициента отражения в 71.2...72.2% при околонулевых значениях внутреннего напряжения.

Третья глава посвящена синтезу и изучению свойств МРЗ на длину волны 13.5 нм, наносимых на МЭМС микрозеркал. Было исследовано большое количество многослойных структур Mo/Si, Mo/Be/Si, Si/C и Si/B₄C синтезированных при разных давлениях атмосферы рабочего газа и с добавлением в нее активных газов (N₂, O₂, H₂). В ходе подготовки этих работ была исследована степень подпыления компонентами МРЗ «внутренней» структуры МЭМС и показано, что выход из строя МЭМС после нанесения МРЗ связан с закороткой ее электродов. С учетом этого были сформулированы требования, по которым выполнялась оптимизация структуры и режимов напыления МРЗ: минимальные внутренние напряжения и максимальное электрическое сопротивление. При этом величина коэффициента отражения не являлась критичным параметром. В результате экспериментальных исследований показано, что из рассмотренных МРЗ оптимальным является структура Si/C, напыляемая в атмосфере рабочего газа с добавлением водорода. Полученная структура обладает хорошими диэлектрическими свойствами, низкими внутренними напряжениями и имеет коэффициент отражения около 10% на длине волны 13.5 нм.

В четвертой главе представлено описание работ по изучению характеристик МЭМС с нанесенными на ее микрозеркала МРЗ Si/C. Исследована деградация МЭМС, отражающие свойства МЭМС с МРЗ и радиационная стойкость МЭМС в рабочем диапазоне длин волн. Показано, что после вскрытия коммерческих МЭМС наступает их быстрая деградация, которая проявляется в потере управления микрозеркалами. Предложен способ нанесения пассивирующего покрытия Al₂O₃ на МЭМС, что значительно повышает ее срок службы в лабораторных условиях. Автором исследованы свойства микрозеркал МЭМС с точки зрения их использования в качестве подложек МРЗ, определены эффективная шероховатость поверхности и отклонение формы поверхности

от плоскости. Показано, что пиковый коэффициент отражающих безстрессовых МС покрытий Si/C на длину волны 13.5 нм, нанесенного на микрозеркала, достигает 2.8%, а интегральный – 7.1%.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует отметить следующее: автором был предложен, синтезирован и изучен ряд многослойных структуры для применения в качестве отражающих покрытий в МРЗ для использования в перспективных литографических установках. Несмотря на то, что ранее проводились теоретические и экспериментальные работы с этими типами МРЗ, их оптимизации с точки зрения получения бесстрессовых покрытий практически не было. В ходе решения поставленных в диссертационной работе задач, автором был создан и оптимизирован ряд многослойных покрытий обеспечивающий оптимальные эксплуатационные характеристики и экспериментально исследованы их свойства. Следует отметить предложенную автором инновационную технологию нанесения МРЗ на МЭМС микрозеркал. Поэтому многие работы Р.М. Смертина имеют пионерский характер.

Новизна подхода, развиваемого диссертантом, заключается в создании многослойных покрытий МРЗ для их использования в литографических установках нового поколения. Аттестация созданных МРЗ проводилась с помощью различных методов, характеризующих их рентгенооптические свойства, межслойные границы и внутренние напряжения. В ходе этих работ были проведена оптимизация структуры с точки зрения минимизации внутренних напряжений при максимальном коэффициенте отражения или минимальной электропроводности. Отдельно необходимо отметить работу по нанесению отражающего покрытия Si/C на 13.5 нм на МЭМС микрозеркал и исследованию его рабочих характеристик.

Достоверность и обоснованность результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением проверенных методов исследований, согласованностью результатов измерений, полученных различными методами, результатами экспериментальных исследований рентгенооптических свойств зеркал.

Диссертация Р.М. Смертина не свободна от недостатков. Можно сделать следующие замечания:

1. В работе приведены результаты исследований серии Mo/Be МРЗ с одинаковым значением периода (в главе 2), однако толщины и количество слоев этих покрытий не приведены. В частности, отмечается, что «по результатам рефлектометрии на разных длинах волн проводилось моделирование внутренней структуры МРЗ», но ни исходная, ни модельная структура в тексте не описаны. Аналогичные замечания касаются описания результатов исследования структур Mo/Be/Si (в главе 3) и C/Si (в главе 4).
2. 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.

3. На рис.2.14 и в сопутствующем тексте для измеренных коэффициента отражения и спектральной ширины покрытий МРЗ Ru/Be не приведен спектральный диапазон, в котором эти измерения проводились.
4. В главе 2, разд.2.3 проводится численное сравнение оптической эффективности многозеркальных литографических систем на основе Ru/Be (для диапазона 11.4нм) и Mo/Si (для 13.5 нм). Однако для понимания преимуществ того или иного диапазона хотелось бы также иметь численную оценку общей эффективности литографической системы с учетом спектральной яркости источника излучения, пропускания фильтров, чувствительности фоторезиста и т.п..
5. На рис.3.3 приведены спектральные коэффициенты отражения двух МРЗ Mo/Be/Si, нанесенных на МЭМС, но нет пояснения, в чем отличия этих МРЗ.
6. В главе 4 приводится пиковый коэффициент отражения от МЭМС с МРЗ на длине волны 13.5 нм. При этом непонятно, на какой площади МРЗ проводились эти измерения: на нескольких микрозеркала, на всей площади одного микрозеркала или на его небольшой части. Т.е. соответствует ли полученное значение среднему пиковому коэффициенту отражения МЭМС с МРЗ.
7. При описании результатов исследования МЭМС на радиостойкость в 4-й главе полезно было бы привести значение поглощенной радиационной дозы в МЭМС.
8. Подпись на рис. 4.9 не соответствует самому рисунку и ссылке на рисунок в тексте диссертации.
9. В тексте довольно много не определенных терминов. Так, автор регулярно использует «коэффициент отражения» без пояснений, относится это к интегральному или пиковому значению. Также без пояснений вводится термин «отражательная способность».

Однако отсутствие эти замечания не снижают научной и практической ценности работы.

Основные результаты обсуждались на отечественных и зарубежных научных конференциях и симпозиумах, они опубликованы в 19-ти рецензируемых журналах, 19-ти сборниках трудов конференций, зарегистрирован 1 патент. Содержание автореферата соответствует диссертационной работе.

Диссертационная работа Смертина Руслана Маратовича «Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии» соответствует паспорту специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики 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.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЗФ СО РАН)



Кузин Сергей Вадимович
18 августа 2025 г.

Даю согласие на обработку персональных данных



Кузин Сергей Вадимович
18 августа 2025 г.

Контактные данные:

ИСЗФ СО РАН

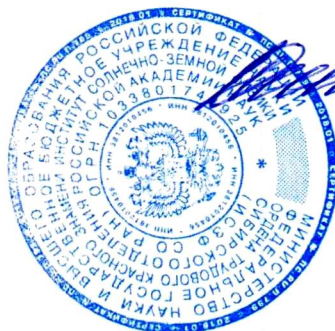
Адрес: 664033, Россия, г. Иркутск,

ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

e-mail: kuzin@mail.iszf.irk.ru

Телефон +7(916) 795-06-93

Подпись официального оппонента С.В. Кузина заверяю
Заместитель директора ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.



С.В. Олемской
18 августа 2025 г.