

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Смертина Руслана Маратовича

«Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии»,

представленную в диссертационный совет 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре «Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу 603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д.7, ауд. 237 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы работы. Серийное производство ключевых элементов микро- и наноэлектроники невозможно без использования литографии, как масочной (проекционной), так и безмасочной, необходимой для изготовления шаблонов и ограниченных серий микросхем. Для изготовления чипов с минимальными топологическими размерами в последние годы все больше используется проекционная ЭУФ литография на рабочей длине волны ~ 13.5 нм. Уже строятся заводы с технологической нормой 1.4 нм и проектируются – с разрешением 1 нм! Единственным производителем подобного уникального литографического оборудования, основу оптики которого составляют Mo/Si многослойные рентгеновские зеркала (MPЗ), на сегодня является нидерландская компания ASML. Стоимость ее последней высокоапертурной и высокопроизводительной литографической ЭУФ установки оценивается в один миллиард долларов; кроме того, подобные установки весьма сложны и дороги в обслуживании. Поэтому, многие страны и большие полупроводниковые компании пытаются ликвидировать отставание, чтобы достичь или, хотя бы, приблизиться к нанометровому уровню разрешения и высокой производительности (низкой себестоимости одного чипа) другими методами. В этой связи, поиск новых высокоотражающих MPЗ на более короткие длины волн, а также улучшение коэффициентами отражения известных MPЗ представляется крайне актуальным. В частности, недавно российскими учеными было продемонстрировано, что одной из перспективных длин волн является 11.2 нм, на которой достигаются более высокие коэффициенты отражения с использованием Ru/Be MPЗ, по сравнению с Mo/Si MPЗ на 13.5 нм, и которая имеет некоторые другие преимущества. Не менее важной задачей является развитие безмасочных методов литографии, которые, с одной стороны, обеспечат нанометровое разрешение, а с другой стороны, невысокую стоимость микросхем при изготовлении небольших серий – за счет отсутствия затрат

на изготовление шаблонов. Примером может служить безмасочная рентгеновская литография на основе МЭМС. Поэтому, поиск и исследование компонентов МРЗ, обеспечивающих низкие внутренние механические напряжения и довольно высокие коэффициенты отражения, является необходимым для развития безмасочной рентгеновской литографии.

В этой связи, диссертационная работа Смертина Р.М., посвященная созданию МРЗ для безмасочной и проекционной рентгеновской литографии, является весьма актуальной.

Научная новизна положений. В диссертационной работе впервые продемонстрированы как возможность повышения коэффициента отражения Mo/Be МРЗ на длине волны ~ 11.3 нм, так и микроструктура и рентгенооптические свойства стабильных Be/Ru МРЗ и Be/Ru МРЗ с буферными слоями Mo на границах раздела, что позволило получить рекордные коэффициенты отражения, в т.ч. для бесстрессовых зеркал. Был предложен новый дизайн Mo/Si МРЗ с «нулевыми» внутренними напряжениями и высоким коэффициентом отражения на длине волны ~ 13.5 нм. Кроме того, в работе впервые получено бесстрессовое диэлектрическое МРЗ, оптимизированное для работы на длине волны ~ 13.5 нм, а также изготовлен и исследован экспериментальный образец динамической маски на базе коммерчески доступной МЭМС микрозеркал, отражающей рентгеновское излучение с длиной волны ~ 13.5 нм.

Достоверность полученных результатов. Автор диссертации опирался на экспериментальные результаты, полученные с использованием современного технологического оборудования и широкого круга зарекомендовавших себя методов рентгеновской, ионной, электронной, микроскопической, оптической и др. диагностик. Он также сравнивал полученные результаты с соответствующими литературными данными. Изучение влияния толщин пленок и рентгенооптических параметров МРЗ проводилось с помощью метода рефлектотрии в мягкой и жесткой рентгеновских областях на лабораторных и синхротронных источниках и с использованием известных компьютерных программ. Кристаллическая микроструктура пленочных материалов исследовалась методом широкоугольной дифракции на лабораторных дифрактометрах, а их состав – с помощью ВИМС и рамановской спектроскопии, а также на синхротронах методами EXAFS и РФЭС. В работе использовались и аналитические подходы, например, определение внутренних напряжений проводилось по формуле Стоуни с учетом изменения радиусов кривизны подложки до и после осаждения на нее многослойного покрытия. Кроме того, автор опирался на широко известные международные базы данных, такие как CXRO. Материалы диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях, а также опубликованы в 19 статьях из списка ВАК, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Практическая значимость результатов работы. Заметным практическим результатом диссертанта является экспериментально показанная возможность создания высокоэффективных МРЗ для литографических установок на длине волны ~ 11.3 нм. Переход на более короткую рабочую длину волны позволяет увеличить разрешающую способность литографического процесса и улучшить некоторые другие его параметры. Экспериментально доказано существование бесстрессовых высокоотражающих Ru/Be МРЗ для работы на длине волны ~ 11.3 нм с коэффициентом отражения ~ 70 %, которые представляют интерес для оптики дифракционного качества. Не менее важным результатом является получение оптимизированных для работы на длине волны ~ 13.5 нм бесстрессовых высокоотражающих Mo/Be/Si МРЗ с высоким (~ 67 %) коэффициентом отражения, а также бесстрессовых диэлектрических C/Si МРЗ, обладающих достаточным коэффициентом отражения (~ 11 %). Дополнительно продемонстрирована возможность создания динамической маски на основе реальной МЭМС структуры, отражающей излучение с длиной волны ~ 13.5 нм, а также сохранение ее свойств в условиях, близких к работе в литографе.

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

Во введении обосновывается актуальность темы и формулируются цели и задачи диссертационной работы. Обсуждаются научная новизна, научная и практическая значимость полученных в ходе выполнения диссертации результатов, а также формулируются положения, выносимые на защиту. Приводится оценка личного вклада автора в полученные результаты.

В первой главе описываются основные проблемы проекционной рентгеновской литографии и возможные методы их решения, наряду с технологическим оборудованием и физическими основами экспериментальных методов исследования, которые использовались при росте и исследовании МРЗ.

Во второй главе приводится подробное описание экспериментального комплекса и результатов, полученных при изучении физических и оптических характеристик Mo/Be и Ru/Be МРЗ, которые предназначены для работы в проекционной рентгеновской литографии на длине волн ~ 11.3 нм. Согласно полученным данным, 12-ти зеркальная оптическая система на основе Ru/Be оптики имеет на 36% большую оптическую эффективность, чем оптическая система на основе Mo/Si оптики для литографии на длине волны ~ 13.5 нм.

В третьей главе посвящена поиску, синтезу и изучению оптических и физических характеристик МРЗ, предназначенных для осаждения на поверхность динамической маски – матрицы микрозеркал для безмасочной рентгеновской литографии. Исследованы зависимости

коэффициента отражения на длине волны ~ 13.5 нм и внутренних механических напряжений в Mo/Be/Si МРЗ от толщин слоев в периоде. Обнаружено, что при значениях толщин слоев Si ~ 1 нм, Mo ~ 2.8 нм и Be ~ 3.2 нм достигаются высокие (~ 67 %) коэффициенты отражения при «нулевых» значениях механических напряжений. В результате поиска и скрупулёзных исследований было обнаружено, что добавление водорода в среду рабочего газа при изготовлении C/Si МРЗ приводит к уменьшению значения внутренних напряжений к околонулевым значениям при сохранении заметного коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм.

В четвертой главе изучены свойства коммерчески доступной матрицы микрозеркал марки DLP6500 0.65 1080p MVSPS600 фирмы Texas Instruments. Были охарактеризованы оригинальные микрозеркала в МЭМС: значение СКО от плоскости исходных микрозеркал $\sim 6-7$ нм с заметным провалом в центре каждого микрозеркала и шероховатостью поверхности с СКО ~ 2 нм. Оработана методика нанесения на МЭМС диэлектрических бесстрессовых отражающих C/Si МРЗ и пассивирующих Al_2O_3 покрытий. Пиковый коэффициент отражения на рабочей длине волны 13.5 нм составил 2.8 %, а интегральный – 7.1 %. Также проведено облучение микрозеркал излучением с длиной волны ~ 13.5 нм, моделирующей условия реального безмасочного литографа.

В заключении формулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

К безусловному общему достоинству диссертации следует отнести огромное количество ростовых и диагностических экспериментов, которые были выполнены для достижения поставленных в работе сложных и разнообразных задач. Качество полученных результатов также впечатляет, в т.ч. такие нетривиальные находки, как бесстрессовые и диэлектрические отражающие покрытия, предназначенные для безмасочной рентгеновской литографии. Работа изложена на хорошем русском языке; в ней есть орфографические ошибки и опечатки, но их не много, и они не ухудшают общего впечатления от ее прочтения.

Тем не менее, по тексту диссертации имеется несколько вопросов/замечаний.

1. На с. 45 параграфа 2.1.1 отмечено: «В данном случае подгонка кривых отражения от отоженных образцов осуществлялась дополнительно с использованием линейной функции [79, 5]. Меня веса функции ошибок и линейной функции удалось добиться удовлетворительной подгонки». Использование двух функций в безмодельном подходе при решении данного рефлектометрической задачи привело к удовлетворительным результатам. Первый вопрос – проводились ли расчеты с использованием трех, четырех функций и, если «да», то каковы результаты? Второй вопрос – имеется ли приемлемая физическая модель переходного слоя (химический состав и толщины), полученная, например, из данных каких-нибудь спектров? Если «да», то как эта модель (результаты расчета) соотносится с данными безмодельного подхода?

2. 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 Mo 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 Mo/Ru/Mo/Be обладает временной стабильностью коэффициента отражения и околонулевыми механическими внутренними напряжениями». За счет внедрения тонких Mo 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 Mo/Ru/Mo/Be МРЗ и упадет ли средний по апертуре коэффициент отражения?

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Смертина Р.М. Диссертация представляет собой целостное, самостоятельное и законченное исследование.

Автореферат в полной мере отражает основные положения диссертации.

По объему и оригинальности полученных результатов, а также по научной значимости диссертационная работа «Многослойные зеркала для безмасочной и проекционной рентгеновской лито-графии» удовлетворяет всем критериям Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), предъявляемым к диссертационным работам, а Смертин Руслан Маратович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:
главный научный сотрудник
Лаборатории наноэлектроники ФГБУВОН
Академического университета имени Ж.И. Алфёрова,
доктор физико-математических наук по специальности
01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Горай Леонид Иванович


04.09.2025г.

Подпись Л.И. Горая заверяю:

Проректор по науке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова, д.ф.-м.н.



Мухин Иван Сергеевич

