

На правах рукописи



Михайленко Михаил Сергеевич

**РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ И МЕТОДОВ ИОННО-
ПУЧКОВОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико – математических наук

Нижний Новгород - 2024

Работа выполнена в Институте Физики Микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"(ИФМ РАН), Нижний Новгород.

Научный руководитель: **Пестов Алексей Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией коротковолновой прецизионной оптики и перспективного приборостроения отдела многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН.

Официальные оппоненты: **Асадчиков Виктор Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор по специальности «Физика конденсированного состояния» МГУ, начальник лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института Кристаллографии РАН (Москва, ФНИЦ Кристаллография и Фотоника).

Карасёв Платон Александрович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 19 декабря 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова" Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте

http://www.ipmras.ru/UserFiles/Diss/2024/mikhaylenko-mikhail-sergeevich/Diss_MikhailenkoMS.pdf

Автореферат разослан 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д24.1.238.02,

доктор физико-математических наук,

профессор РАН



Водолазов Денис Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Развитие современных технологий, науки и техники требует повышения качества оптических элементов и оптических систем в целом. За последние 10 лет требования к точности формы и шероховатости поверхности перешли в субнанометровую область. В первую очередь это связано с переходом в коротковолновый диапазон длин волн: от вакуумного ультрафиолетового (ВУФ, длины волн 100–200 нм) до экстремального ультрафиолетового (ЭУФ, длины волн 10–100 нм) и даже мягкого рентгеновского (МР, длины волн 3–10 нм). Здесь появляется все больше как научных задач, связанных, например, с изучением физики Солнца и верхних слоев атмосферы [1], так и прикладных, таких, как системы мониторинга околоземного пространства в ВУФ [2]. Активно развиваются технологии создания микроэлектроники посредством ЭУФ нанолитографии [3], а также разрабатываются методики диагностики в области «водяного окна» (длины волн 2.4–4 нм) [4]. В этих областях спектра электромагнитного излучения значительное влияние оказывает поглощение, в связи с чем здесь невозможна традиционная преломляющая оптика, т.е. разработчики вынуждены использовать только зеркальные оптические элементы. Для рентгеновского диапазона есть область полного внешнего отражения, при углах падения излучения меньше критического, которая позволяет обеспечить близкий к единице коэффициент отражения, однако построение прецизионной изображающей оптики на элементах скользящего падения невозможно в силу значительных сферических aberrаций при существенно неосевом падении излучения на поверхность и низких числовых апертур оптических элементов. Следовательно, необходимо создание элементов нормального падения, что в этой области длин волн возможно только с применением многослойных интерференционных структур, коэффициенты отражения которых на рабочих длинах волн, могут достигать десятки процентов [5-10]. Тем не менее это существенно отличается от 100%, и если в преломляющей оптике решение таких проблем, как расширение поля зрения оптических систем, удастся решать с помощью многолинзовых объективов, каждый элемент которого при этом является сферическим, то в случае МР и ЭУФ излучения из-за низкого отражения необходимо минимизировать число элементов. Соответственно, чтобы получить изображение дифракционного качества в широком поле зрения, элементы объектива должны быть асферическими, причем зачастую это очень сложная асферика четвертого, шестого и даже более высоких порядков [A24], с точностью формы поверхности на уровне единиц нм, что существенно усложняет их изготовление. Кроме того, для приближения к теоретическому пределу коэффициента отражения зеркал, помимо качества самой многослойной структуры, существенное значение имеет шероховатость подложки, оказывающая значительное влияние на межслойную шероховатость структуры, и, как следствие, на величину коэффициента отражения. Таким образом, требуется существенное повышение качества оптических поверхностей, как с точки зрения точности их формы, так и шероховатости (атомарного уровня) [11]. Такие точность и гладкость

поверхности могут быть достигнуты только при использовании ионно-пучковых методов обработки [A18, 12].

В данной работе исследуется поведение шероховатости поверхности и коэффициентов распыления перспективных материалов для подложек элементов рентгеновской оптики при воздействии ускоренными ионами. Экспериментально найдены параметры, обеспечивающие сглаживание поверхности аморфных материалов, которые качественно подтверждены с помощью численного моделирования на разработанном алгоритме физического распыления. Обнаружено и объяснено пороговое изменение поведения шероховатости поверхности монокристаллического кремния при увеличении энергии бомбардирующих ионов. На основе полученных в ходе исследования результатов разработан ряд технологических решений и методов, позволивших сформировать рентгенооптические элементы дифракционного качества, применяемых в широком диапазоне длин волн (от жесткого рентгеновского до вакуумного ультрафиолетового).

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на доступность технологии ионного травления и длинной истории развития физики ионного распыления твёрдых тел (со времён первых опытов Гроува по изучению явления катодного распыления [13] прошло уже более 100 лет) остается множество открытых вопросов, в частности, поведение шероховатости поверхности под ионным пучком. Более того, ввиду развития технологий и повышения требований к оптическим элементам на точность формы и шероховатость поверхности появляются новые задачи, которые можно решить с помощью ионного травления.

Основной бум публикаций, посвященных изучению процесса ионного распыления, произошёл в 70-х годах XX века. Именно тогда были предприняты усилия по разработке технологий сверхточной обработки поверхностей для удовлетворения требований к высококачественным оптическим элементам с применением ускоренных ионов. Долгое время при ионном травлении применялись высокоэнергетичные пучки ионов с энергией от 1 до 10 кэВ [14], значения коэффициентов распыления измерялись фактическим взвешиванием образцов до и после травления, а шероховатость лишь качественно оценивалась исходя из вида морфологии поверхности на электронных микрофотографиях.

С развитием технологий и появлением сканирующей зондовой микроскопии, в частности, атомно-силового микроскопа, а также расширением возможностей интерферометрических измерений, удалось применить пучки ускоренных ионов для изготовления прецизионной оптики дифракционного качества.

В мире существуют ряд крупных компаний, такие как Carl Zeiss (Германия), Canon (Япония) и некоторые другие, которые достигли значительных успехов в области изготовления прецизионных оптических элементов, в том числе и для коротковолнового диапазона длин волн, однако, подробности применяемых ими методов публично не раскрываются. Кроме того, коммерческие установки для ионного травления являются узкоспециализированными (используется один источник ускоренных ионов, например, для стравливания малого слоя материала

или чистки поверхности от адсорбирующихся примесей). Более того, сами источники для ионной коррекции формы должны обладать специфическими характеристиками, – пучок должен быть минимального размера (для увеличения плотности для обработки пространственной частоты) с достаточной величиной плотности ионного тока, на уровне единиц мА/см² (для обеспечения заметной скорости травления).

Особое внимание следует уделить исследованию взаимодействия ускоренных ионов с перспективными для рентгенооптических приложений материалами, так как их структура и состав сильно влияют на результат травления. Особенно, это касается монокристаллических материалов, которые сейчас становятся фаворитами для подложек оптических элементов, работающих под мощными пучками высокоэнергетических фотонов. Отдельно стоит отметить отсутствие программного обеспечения (доступного), позволяющего оптимизировать процедуры ионной коррекции ошибок формы и асферизации.

Целью диссертационной работы является изучение ионного распыления перспективных материалов для подложек оптических элементов рентгеновской оптики с перспективой создания методик формообразования и полировки пучками ускоренных ионов, а также разработка соответствующего оборудования. Для достижения целей диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Исследование влияния вида газа, углов падения, кристаллографической ориентации и энергии ионов (в диапазоне 0.1 - 1.5 кэВ) на коэффициенты распыления и поведения шероховатости поверхности перспективных материалов при облучении пучками ускоренных ионов.

2. Разработка и запуск оборудования для ионно-пучковой обработки поверхности оптических элементов.

3. Развитие методик ионной обработки поверхностей перспективных материалов для создания элементов рентгеновской оптики.

Научная новизна работы

Впервые в России реализованы возможности формирования оптических элементов с субнанометровой точностью формы, основой чему стало изучение ионного распыления оптических материалов, таких как плавленый кварц и монокристаллический кремний. Данные материалы являются приоритетом современных исследований процесса финишной обработки поверхности [15-17]. В рамках работы впервые проведен глубокий анализ возможностей ионно-пучкового травления для создания технологии формирования прецизионных рентгенооптических элементов с атомарно гладкой поверхностью. Предложены технологические покрытия, позволившие реализовать методику формирования рентгенооптических элементов из бериллия, что важно для космических миссий. Впервые изучено влияния ионного травления на частотные свойства шероховатостей в зависимости от параметров процесса (угол падения, энергия ионов, глубина травления и флюенс), определены причины порогового изменения поведения зависимости высоты шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии бомбардирующих ионов.

Изучена структура приповерхностного “нарушенного” слоя, формирующегося в процессе ионной бомбардировки из-за имплантации и каскада

столкновений. Показано, что рост интенсивности диффузного рассеяния связан с образованием “нарушенного” слоя за счет формирования радиационных разрушений под поверхностью, а не с развитием шероховатости.

Разработаны и собраны установки ионно-пучкового, позволившие реализовать методики ионной коррекции формы, асферизации и полировки при воздействии на поверхность пучков ускоренных ионов инертных газов. Разработанный в рамках диссертационной работы и примененный в установке источник с фокусировкой ионного пучка обладает рекордными для задач ионно-пучковой обработки оптических элементов характеристиками.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведено исследование взаимодействия ускоренных ионов инертных газов (Ar, Ne, Xe) с широким спектром оптических материалов (плавленый кварц, аморфный и поликристаллический бериллий, монокристаллический кремний различных ориентаций). В ходе исследований найдены параметры ионного пучка, обеспечивающие сохранение или даже сглаживание поверхностной шероховатости при значительных съемах материала. На основе полученных данных разработаны методики ионно-пучковой коррекции формы, асферизации и полировки оптических материалов.

Разработан источник ускоренных ионов с рекордными для задач ионно-пучковой обработки оптических элементов параметрами. Фокусирующая ионно-оптическая система позволила получить минимальный размер ионного пучка (ширина на полувысоте до 1.5 мм) без обрезających пучок диафрагм, что при токе ионов до 1.5 мА позволило получить рекордную плотность ионного тока до 90 мА/см² и увеличить скорость травления до 0.5 мкм/мин.

Разработаны и запущены две экспериментальные установки для проведения осесимметричной коррекции (асферизации) широкоапертурным источником с квазипараллельным ионным пучком, в том числе с возможностью работы с химически-активными газами. На одной из установок существует возможность замены широкоапертурного источника на источник с фокусировкой ионного пучка, что позволяет проводить процедуру коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком.

Создан ряд элементов и систем для рентгеновского, МР и ЭУФ диапазонов длин волн. В частности, изготовлены подложки объектива ЭУФ микроскопа (ИФМ РАН), системы имиджинга плазменного факела лазерно-плазменного источника на базе субпетаваттного лазера PEARL (ИПФ РАН); двойной кристалл-монохроматор и нанофокусирующую систему для станции 1-1 «Микрофокус» синхротронного источника фотонов «СКИФ» (Новосибирск, Россия).

Методология и методы исследования

Объектами для изучения энергетических и угловых зависимостей коэффициента рассеяния и величины эффективной шероховатости поверхности выступали пластины из плавленого кварца (SiO₂) марки KB, пластины из монокристаллического кремния (100), (110) и (111), а также образцы из поликристаллического бериллия, полученные спеканием порошка. Плёнки

аморфного бериллия были нанесены методом магнетронного распыления в среде аргона.

Поверхность исследуемых образцов характеризовалась методом атомно-силовой микроскопии с последующим вычислением и построением функции спектральной плотности мощности шероховатости. Измерение глубины травления проводилось на интерферометре белого света TalySurf CCI 2000. Изучение нарушенного слоя производилось с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света в геометрии обратного рассеяния с использованием двух спектрометров: Horiba Jobin Yvon: T64000 спектрометр с твердотельным лазером ($\lambda = 514.5$ нм) и LabRam HR800 спектрометр с ультрафиолетовым He-Cd лазером ($\lambda = 325$ нм) и вторичной ионной масс спектрометрии на установке TOF.SIMS 5, а также методами малоуглового диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения и малоугловой рентгеновской дифракции на установке Phillips X'Pert Pro.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Найденные параметры процесса травления: газ, энергия ионов, угол падения; развитие методы и разработанное оборудование позволяет проводить полировку, асферизацию и коррекцию локальных ошибок формы оптических элементов из плавленного кварца, бериллия и монокристаллического кремния с числовой апертурой до 0.5 с субнанометровой точностью и шероховатостью поверхности в диапазоне пространственных частот $4.9 \cdot 10^{-2}$ - $6.3 \cdot 10^1$ мкм⁻¹ лучше 0.3 нм.
2. Влияние энергии ионов на шероховатость поверхности при ионно-пучковом травлении монокристаллического кремния носит пороговый характер, что объясняется частичной аморфизацией приповерхностного слоя. Пороговые энергии составили для ионов аргона: Si(100) – 425 эВ; Si(110) – 550 эВ; Si(111) – 550 эВ, для ионов ксенона – 900 эВ и для ионов неона – 300 эВ.
3. Разработанные ионно-оптическая система и система компенсации заряда пучка для источника ускоренных ионов с холодным катодом обеспечивает повышение плотности тока в пучке с 12 мА/см² до 90 мА/см², уменьшение размера пучка с 8.5 мм до 1.5 мм, что привело к росту скорости травления в 7.5 раз и уменьшению максимально доступной к обработке пространственной частоты до $4.1 \cdot 10^{-4}$ мкм⁻¹.
4. Моделирование процесса физического распыления методом Монте-Карло однокомпонентных аморфных мишеней с использованием феноменологических данных по коэффициентам распыления и карты поверхности позволяет проводить количественную оценку энергетической и угловой зависимости коэффициента распыления и предсказать эволюцию шероховатости поверхности.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы были опубликованы в рецензируемых научных и специализированных изданиях [A1-A25] и в сборниках тезисов [T1-T52], также

имеется два патента на изобретение. Апробация содержащихся в диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях, симпозиумах и совещаниях: Исследование процессов ионного распыления плавленного кварца ионами аргона в диапазоне энергий до 1.5 кэВ и методика коррекции оптических элементов были представлены на международном симпозиуме «Нанозлектроника и нанопластика» Нижний Новгород в 2019 году. Демонстрация возможности ионной полировки технологических покрытий на основе плёнок Si и Ni на поверхности массивного бериллия обсуждалась на конференции SPIE Optics + Optoelectronics в Праге (Чехия) в 2019 году. Модернизация миниатюрного источника ускоренных ионов обсуждалась на международном симпозиуме «Нанозлектроника и нанопластика» Нижний Новгород в 2019 и 2020 году. Особенности поведения шероховатости поверхности основных ориентаций монокристаллического кремния при ионном травлении представлялись и обсуждались на международном симпозиуме «Нанозлектроника и нанопластика» Нижний Новгород в 2021, 2022 и 2023 годах, «Рентгеновская оптика – 2021», г. Черноголовка, 2021 году, на школе молодых ученых «Современная рентгеновская оптика» в 2022, а также на XXVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью-2023» г. Ярославль в 2023 году. Результаты по развитию методик симметричной коррекции широкоапертурным ионным пучком, в частности описание алгоритма было представлено на международном симпозиуме «Нанозлектроника и нанопластика» Нижний Новгород в 2021.

Личный вклад автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, подготовка и проведение экспериментов, анализ и обобщение полученных результатов, написание и публикация статей, активное участие в конструировании и запуске стендов для ионно-пучковой коррекции формы. Написание алгоритмов для расчета масок на языке Python и численного моделирования процесса физического распыления с учетом эволюции поверхности на языке C++.

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложена на 180 страницах, содержит 100 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 177 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, содержится постановка задачи исследования. Формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации. Указывается структура и объем диссертации и публикации по теме в журналах и сборниках.

В первой главе приводится обзор литературы по ионно-пучковому травлению, в котором отражены основные аспекты ионно-пучкового травления в контексте модификации формы и шероховатости поверхности твердых тел, дается описание принципов работы источников ускоренных ионов для проведения процедуры коррекции формы поверхности оптических элементов, приводится обзор работ по существующим моделям расчёта значений коэффициента распыления и эволюции

поверхности, а также программным пакетам, использующим эти модели. Заканчивается глава описанием требований к оптическим элементам современной рентгеновской оптики.

Вкратце они могут быть сформулированы следующим образом. Отклонения формы поверхности подложки от “идеальной” могут быть разложены по частотам пространственного спектра (метод PSD-функции, power spatial density) [11]. Его условно можно разделить на три поддиапазона: низкие пространственные частоты (10^{-3} - 10^{-6} мкм⁻¹), средние (10^{-3} - 10^0 мкм⁻¹) и высокие (10^0 - 10^3 мкм⁻¹). Низкочастотные отклонения (латеральные размеры неоднородностей больше 1 мм) принято называть ошибками формы, средние и высокие пространственные частоты (латеральные размеры неоднородностей меньше 1 мм) - шероховатостью. Ошибки поверхности в каждом из обозначенных поддиапазонов оказывает специфическое влияние на качество изображения оптической системы (рис.1). Низкие пространственные частоты отвечают за формирование изображения. При отклонении формы поверхности от расчетной в диапазоне низких пространственных частот, происходит абберационное искажение изображения. Шероховатости поверхности в области средних пространственных частот вызывает рассеяние излучения на небольшие углы, излучение при этом остается в пределах Брегговского максимума и распространяется по зеркалам оптической системы, что приводит к размытию изображения, и, как следствие, потере разрешающей способности изображающей оптики. Шероховатость поверхности в области высоких пространственных частот вызывает рассеяние излучения на большие углы, излучение при этом выходит за пределы Брегговского максимума, что приводит к падению коэффициента отражения от нанесенных на поверхность подложки многослойных зеркал.

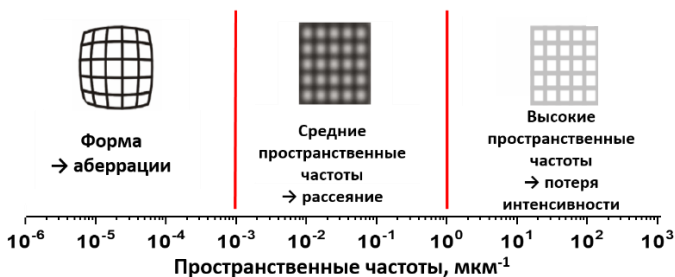


Рис.1. Влияние пространственных частот на качество изображения.

Для достижения пространственного разрешения, обеспечивающего дифракционное качество изображения необходимо чтобы точность формы поверхности оптических элементов была лучше $\lambda/14$ по параметру СКО (рис.2.).

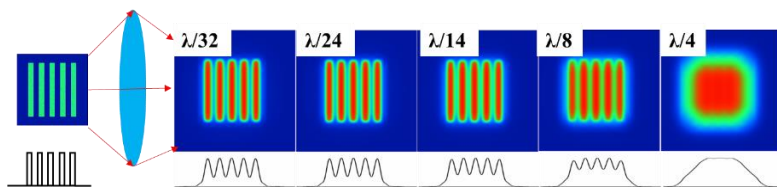


Рис.2. Демонстрация качества изображения от точности формы объектива.

Для обеспечения близких к теоретическим значениям коэффициентов отражения многослойных рентгеновских зеркал, шероховатость подложки должна быть менее 0.3 нм во всём диапазоне пространственных частот. Особые требования к точности формы, шероховатости и глубине приповерхностного слоя с нарушенной структурой предъявляются при использовании оптических элементов без отражающего покрытия. Например, для кристаллов-монокроматоров взаимодействие с рентгеновским излучением происходит в приповерхностной области.

Во второй главе описаны стенд для изучения коэффициентов распыления, методы измерений и приборы для изучения шероховатости поверхности и нарушенного слоя. В рамках работы впервые проведен глубокий анализ возможностей ионно-пучкового травления для создания технологии формирования прецизионных рентгенооптических элементов с атомарно гладкой поверхностью. Изучено влияния ионного травления на шероховатость поверхности в зависимости от параметров процесса (угол падения, энергия ионов, глубина травления и флюенс) (рис.3).

Изучено поведение коэффициентов распыления и шероховатости поверхности плавленого кварца в диапазоне пространственных частот $0.049-63 \text{ мкм}^{-1}$ от энергии и углов падения ионов аргона в диапазоне энергий до 1.5 кэВ. Показано, что ионно-пучковое травление ускоренными ионами аргона с энергией 1250 эВ позволяет обрабатывать оптические элементы с числовой апертурой до 0.5, обеспечивая шероховатость лучше 0.3 нм, что удовлетворяет требованиям современной рентгеновской оптики [A1].

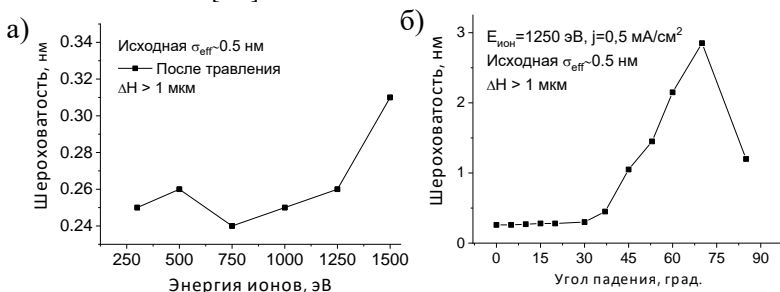


Рис.3. а) Зависимость эффективной шероховатости поверхности плавленого кварца от энергии ионов аргона; б) зависимость шероховатости поверхности плавленого кварца от угла падения ионов аргона с энергией 1250 эВ.

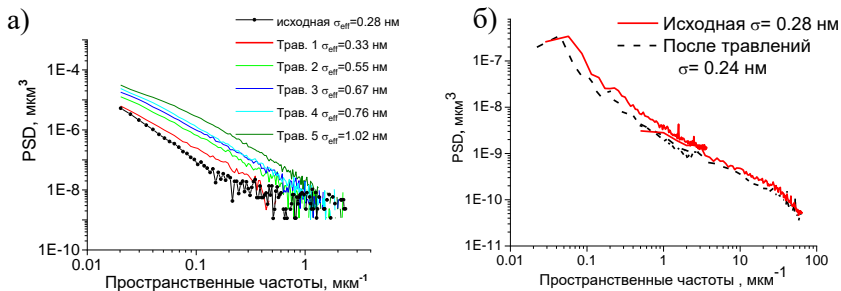


Рис.4. а) Функция спектральной плотности мощности шероховатости поверхности плавного кварца, полученный из данных диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения после серии травлений на глубину 11 мкм; б) Функция спектральной плотности мощности шероховатости поверхности плавного кварца, полученный из данных атомно-силовой микроскопии.

Исследован процесс формирования приповерхностного нарушенного слоя, определены его структура и глубина [А6]. Показано, что методика аттестации шероховатости поверхности с помощью малоуглового диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения может применяться только для образцов, не подвергавшихся ионному травлению, так как формирование нарушенного слоя за счёт радиационных дефектов приводит к росту интенсивности диффузного рассеяния.

Изучено поведение коэффициентов распыления и величины шероховатости поверхности основных срезов $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ монокристаллического кремния при облучении ускоренными ионами Ar, Ne и Xe [A16, A17, A19, A23, T2].

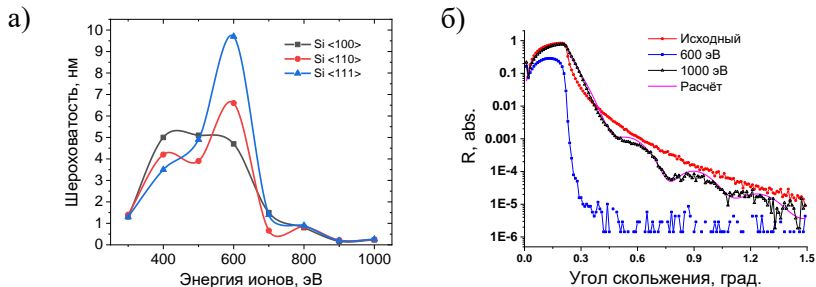


Рис.5. а) Зависимость эффективной шероховатости поверхности основных ориентаций монокристаллического кремния от энергии ионов ксенона; б) Угловая зависимость коэффициента отражения жесткого рентгеновского излучения для исходных образцов, подвергшихся травлению ионами ниже пороговой, выше пороговой и расчёт.

Впервые обнаружен ярко выраженный пороговый характер поведения шероховатости от энергии (рис.5а), т.е. существует диапазон энергий ионов, при которых шероховатость сглаживается, и диапазон энергий при которых, наоборот, наблюдается рост шероховатости. Анализ модификации приповерхностного слоя

монокристалла после ионного травления проводился методами Рамановской спектроскопии, рентгеновского отражения (рис.5б), а также просвечивающей электронной микроскопии. Пороговая зависимость объяснена появлением квазиаморфной фазы в приповерхностном слое толщиной ~ 12 нм.

В третьей главе описаны методики коррекции формы поверхностей оптических элементов с применением ионно-пучкового травления, в частности, принцип коррекции локальных ошибок формы поверхности, реализованный в ИФМ РАН [A12, A22].

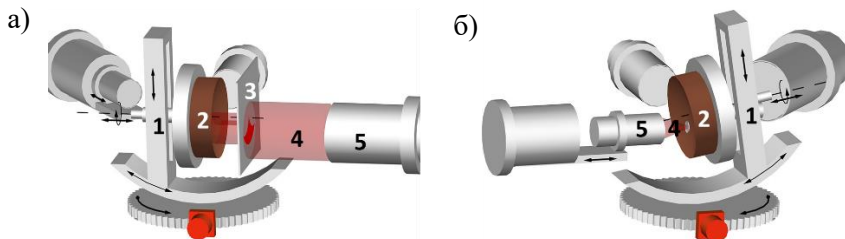


Рис. 6. а) Схема проведения осесимметричной коррекции формы широкоапертурным ионным пучком; б) схема проведения коррекции локальных ошибок формы фокусирующим ионным пучком. 1 - гониометр; 2 - образец; 3 - формирующая ионный пучок диафрагма; 4 - ионный пучок; 5 - ионный источник.

Для осесимметричной коррекции формы написана программа расчета формирующих ионный пучок диафрагм (масок), в том числе для равномерного съёма материала, который находит применение, например, для полировки поверхности образца диаметром в два диаметра ионного пучка. Предложено технологическое покрытие для поверхностей [A5], не поддающихся механической и ионной полировке, испытанное на плёнках и массивном бериллии.

В четвертой главе описаны две установки для проведения локальной коррекции ошибок формы и симметричной обработки поверхности, в том числе и с использованием химически-активных газов, разработанные и собранные с учетом результатов исследований, полученных в рамках работы (рис.7а).

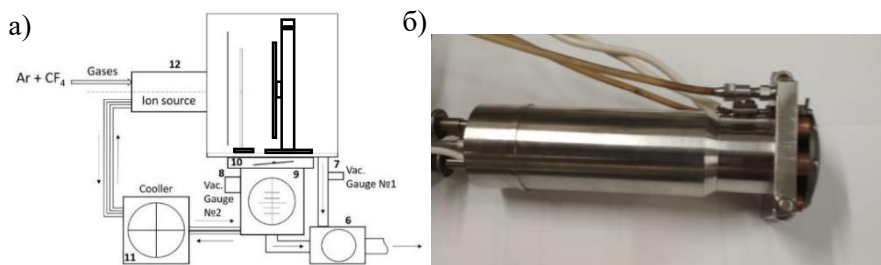


Рис.7. а) Схема разработанного стенда для проведения ионной коррекции формы; б) фотография разработанного источника ускоренных ионов.

Большое внимание уделено разработке и модернизации миниатюрного источника ускоренных ионов с фокусирующей ионно-оптической системой для задач коррекции локальных ошибок формы [А14] (рис.7б). В конце главы приводятся некоторые результаты применения развитых в рамках работы методов. Разработанные методики и оборудование позволили создать ряд оптических элементов для изображающих систем нормального падения, а также для систем, работающих в геометрии скользящего падения. За счёт ионной полировки поверхности штриха нарезных и голографических дифракционных решеток удалось повысить эффективность первого порядка дифракции до 30 раз в диапазоне длин волн 4.47 - 17.1 нм [А3, А10]. Осесимметричная асферизация была применена для профилирования подложек зеркал солнечного телескопа ВУФ диапазона для наноспутников [Т1]. Методом ионно-пучковой коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком сформирована заготовка для подложки коллимирующей системы Киркпатрика-Баеза с точностью формы 0.7 нм по параметру СКО [Т3] (рис.6). С применением методик изготовлены подложки зеркал действующего ЭУФ микроскопа (ИФМ РАН, Нижний Новгород) на основе двухзеркального объекта Шварцшильда, обеспечивающего пространственное разрешение 140 нм [А20].

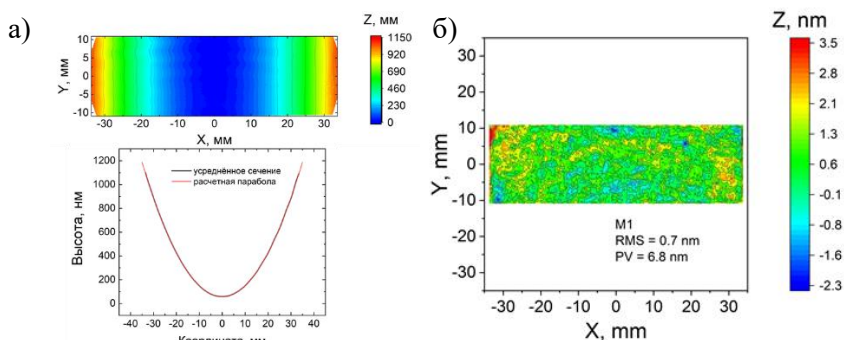


Рис.8. Пример поверхности цилиндрического парабоида с отклонением от плоскости более микрона, который был сформирован широкоапертурным пучком (а); после процедуры локальной коррекции точность формы стала 0.7 нм по параметру СКО (б).

В пятой главе предложена модель описания процесса физического распыления с учетом эволюции поверхности. В рамках данной работы рассматривается трехмерная механическая модель физического распыления аморфной однокомпонентной мишени, где мишень имеет поверхность. Предлагаемая модель использует ряд допущений, упрощающих вычисления:

- Рассматриваемая мишень является аморфной;
- Учитываются только парные столкновения;
- Упругие и неупругие потери энергии рассматриваются отдельно, причем неупругие рассматриваются непрерывными. В модели непрерывного электронного торможения рассматривается пролёт частицы в электронном облаке. Потери происходят в основном за счет возбуждения слабо связанных валентных или

свободных электронов. Ион почти не рассеивается на электронах вследствие большой разницы масс. В таком случае можно считать, что на ион действует непрерывная тормозящая сила, направленная в противоположную сторону.

- Дискретно учитываются такие упругие столкновения, в которых передача энергии движения частицей атому мишени превышает некоторую пороговую энергию связи E_d .

Предложенный алгоритм, реализован на основе метода Монте-Карло для трёхмерного случая взаимодействия иона с поверхностью аморфного гомогенного твёрдого тела, также приводятся результаты моделирования зависимости коэффициента распыления и шероховатости поверхности для аморфного кремния и ионов аргона, которые сравниваются с экспериментом [A18]. Были рассчитаны карты поверхностей аморфного кремния после травления ионами аргона с энергией 800 эВ под нормалью и под углом 60 градусов. Исходная шероховатость была 0.12 нм. Такой же фрагмент был найден на реальной подложке с такой же шероховатостью, который подвергли травлению с такими же параметрами. В результате эксперимента под нормалью подложка сгладилась до 0.1 нм, как и в расчёте, а под углом, напротив, ухудшилась до 0.13 нм. На рисунке 10 приведены рассчитанные и экспериментально измеренные карты поверхностей после травления под нормалью.

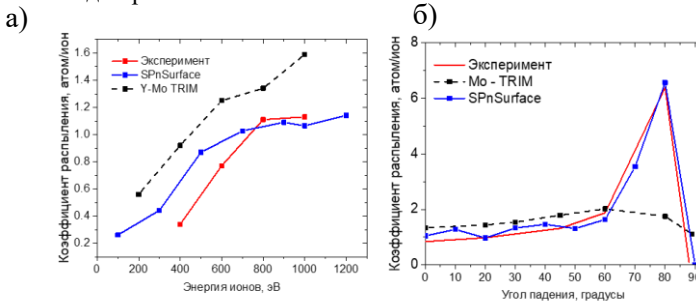


Рис.9. Зависимости коэффициента распыления молибдена от энергии (а) и угла падения (б) ускоренных ионов аргона, полученные экспериментально, посчитанные в TRIM и предложенным алгоритмом.

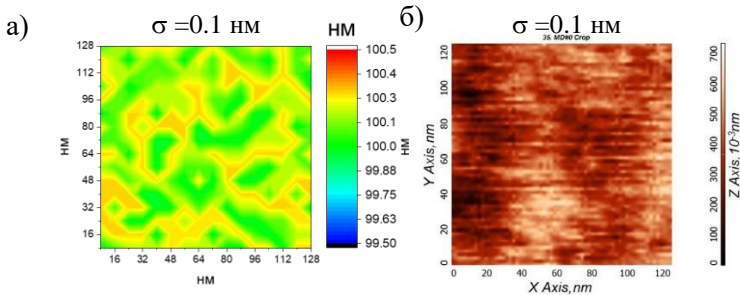


Рис.10. Рассчитанные карты поверхности 128x128 нм аморфного кремния облученного ионами аргона с энергией 800 эВ под нормалью (а) экспериментально полученная поверхность (б). Исходное значение шероховатости $\sigma = 0.12$ нм.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам работы, которые заключаются в следующем:

1. Изучено поведение коэффициентов распыления и шероховатости поверхности плавленного кварца от энергии и углов падения ускоренных ионов аргона в диапазоне энергий от 0.3 до 1.5 кэВ. Показано, что ионно-пучковое травление плавленного кварца ускоренными ионами аргона с энергией 1250 эВ позволяет обрабатывать оптические элементы с числовой апертурой до 0.5 и обеспечивает шероховатость поверхности лучше 0.3 нм, что удовлетворяет требованиям современной рентгеновской оптики.
2. Изучено поведение коэффициентов распыления и шероховатости поверхности основных срезов монокристаллического кремния при облучении ускоренными ионами Ar, Ne и Xe. Обнаружено пороговое поведение шероховатости поверхности от энергии ионов. При энергии выше которой наблюдается сглаживание шероховатости поверхности.
3. Изучена структура и свойства приповерхностного “нарушенного” слоя, формирующегося в процессе ионной бомбардировки кварца и монокристаллического кремния. Пороговое поведение шероховатости поверхности монокристаллического кремния объясняется формированием квазиаморфной фазы в приповерхностном слое толщиной ~ 12 нм.
4. Разработан малогабаритный источник с фокусирующей ионно-оптической системой, накальным нейтрализатором и водоохлаждаемым кожухом, который позволил повысить скорость обработки в 7.5 раз без использования коллимирующей диафрагмы.
5. Разработанное оборудование и методы используются для создания зеркал для рентгеновской микроскопии, объектива для безмасочного литографа, диагностики короны Солнца, диагностики плазмы и синхротронных применений.
6. Предложен алгоритм, основанный на методе Монте-Карло для трёхмерного случая распыления поверхности аморфного гомогенного твёрдого тела. Результаты численного моделирования энергетической и угловые зависимости коэффициента распыления и поведения шероховатости для аморфного кремния и молибдена ионами аргона хорошо согласуются с наблюдаемыми в экспериментах.

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. Mikhailenko M.S. Ion-beam polishing of fused silica substrates for imaging soft x-ray and extreme ultraviolet optics / M.S. Mikhailenko, N. I. Chkhalo, S. A. Churin, M. A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, and M. V. Zorina. // Applied Optics Vol. 55, Issue 6, 2016, pp. 1249-1256.

A2. Mikhailenko M.S. Sputtering of carbon using hydrogen ion beams with energies of 60–800 eV / M.S. Mikhailenko, D.S. Sidorov, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2016. - Volume 387. - Pages 73-76.

- A3. Mikhailenko M.S. The diffraction efficiency of echelle gratings increased by ion-beam polishing of groove surfaces / M.S. Mikhailenko, M.V. Zorina, S. Yu. Zuev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo // *Technical Physics Letters*. – 2016. – Vol. 42. – P. 844–847.
- A4. Mikhailenko M.S. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams / M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin // *Precision Engineering*. Volume 48, April 2017, Pages 338–346.
- A5. Mikhailenko M.S. Effect of ion beam etching on the surface roughness of bare and silicon covered beryllium films / M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.V. Mil'kov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, M.V. Zorina, S. Yu. Zuev. // *Surface and Coatings Technology*. Volume 311, 15 February 2017, Pages 351–356.
- A6. Mikhailenko M.S. X-ray scattering by the fused silica surface etched by low-energy Ar ions / M.S. Mikhailenko, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, Y.A. Vainer, P.A. Yunin, M.V. Zorina. // *Journal of X-Ray Science and Technology*. – 2019. - vol. 27. - no. 5. - P. 857–870.
- A7. Mikhailenko M.S. Effect of ion beam etching on the surface roughness of bare and silicon covered beryllium / M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.V. Mil'kov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, M.V. Zorina, S. Yu. Zuev // *Proc. SPIE*. – 2019. - Volume 10235. – P. 102350M.
Event: SPIE Optics + Optoelectronics, 2017, Prague, Czech Republic
- A8. Mikhailenko M.S. The effect of bombardment with neutralized neon ions on the roughness of a fused silica and beryllium surface / M.S. Mikhailenko, M.V. Zorina, D.E. Pariev, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, S.A. Churin, N.I. Chkhalo // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2017. - Vol. 11. – P. 485–489.
- A9. Mikhailenko M.S. Ultrasoother beryllium substrates for solar astronomy in extreme ultraviolet wavelengths / M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, M.V. Zorina, S.Yu. Zuev, D.S. Kazakov, A.V. Milkov, I.L. Strulya, V.A. Filichkina, A.S. Kozlov // *Applied Optics*. – 2019. - Vol. 58. - No. 13.
- A10. Mikhailenko M.S. Modification and Polishing of the Holographic Diffraction Grating Grooves by a Neutralized Ar Ion Beam / M.S. Mikhailenko, S. A. Garakhin, M. V. Zorina, S. Yu. Zuev, A. E. Pestov, R. S. Pleshkov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo // *Technical Physics*. – 2020. - Vol. 65. - No. 11. - P. 1780–1785.
- A11. Mikhailenko M.S. Ion-Beam Methods for High-Precision Processing of Optical Surfaces / M.S. Mikhailenko, I. G. Zabrodin, M. V. Zorina, I. A. Kas'kov, I. V. Malyshev, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko, A. K. Chernyshev, N. I. Chkhalo. // *Technical Physics*. – 2020. - Vol. 65. - No. 11. - P. 1837–1845.
- A12. Mikhailenko M.S. Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements / M.S. Mikhailenko, A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov // *Precision Engineering*. – 2021. - Vol. 69. - P. 29–35.
- A13. Mikhailenko M.S. Miniature Ion Source KLAN-10M with a Plasma Neutralizer / M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, L.A. Goncharov // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2019. - V.13. – P. 182–187.

- A14. Mikhailenko M.S. Miniature source of accelerated ions with focusing ion-optical system / M.S. Mikhailenko, A. Pestov, N. Chkhalo, L. Goncharov, A. Chernyshev, I. Zabrodin, I. Kaskov, P. Krainov, D. Astakhov, V. Medvedev // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2021. – Vol. – 1010. – P. 165554.
- A15. Торопов М.Н. Линзовый корректор волнового фронта для изучения плоских поверхностей / М.Н. Торопов, А.А. Ахсахалиян, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало // Журнал технической физики – 2021. - Том 91. - Вып. 10. - С. 1583-1587.
- A16. Mikhailenko M.S. Influence of ion-beam etching by Ar ions with an energy of 200-1000 eV on the roughness and sputtering yield of a single-crystal silicon surface/ M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, M.V. Zorina, A.K. Chernyshev, N.N. Salashchenko, I.I. Kuznetsov // Applied Optics. – 2022. V. – 61. – P. 10.
- A17. Михайленко М.С. Изучение влияния энергии ионов аргона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко // Журнал технической физики. – 2022 - Том 92. - Вып. 8.
- A18. Пестов А.Е. Модель физического распыления аморфных материалов / А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало // Журнал технической физики. – 2022. - Том 92. - Вып. 8.
- A19. Kumar N. Raman scattering studies of low energy Ar⁺ ion implanted monocrystalline silicon for synchrotron applications / N. Kumar, V.A. Volodin, S.V. Goryainov, A.K. Chernyshev, A.T. Kozakov, A.A. Scryabin, N.I. Chkhalo, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, M.V. Zorina // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2023. – Vol. 534. – P. 97–102.
- A20. Malyshev I.V. High-aperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography / I.V. Malyshev, D.G. Reunov, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, A. E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Tsybin, A.YA. Lopatin, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, R.M. Smertin, R.S. Pleshkov AND O.M. Shirokova // Optics Express. – 2022. Vol. 30. - No. 26. – P. 47567.
- A21. Зорина, М.В. Алмаз-карбид-кремниевый композит “скелетон” как перспективный материал для подложек рентгенооптических элементов / М.В. Зорина, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, С. К. Гордеев, В.В. Виткин // Журнал технической физики. – 2022. – т.92. – вып.8. – с.1238-1242.
- A22. Chernyshev A. Axisymmetric surface shape correction of optical elements by a wide-aperture ion beam / Aleksei Chernyshev, Nikolay Chkhalo, Ilya Malyshev, Mikhail Mikhailenko, Alexey Pestov, Nikolay Salashchenko, and Mikhail Toropov // Applied Optics. – 2022. - Vol. 61. - No. 33.
- A23. Михайленко М.С. Изучение влияния энергии ионов неона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионном травлении / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко // Журнал технической физики. – 2023. - Том 93. - Вып. 7.
- A24. Чхало Н.И. Внеосевой асферический коллектор для экстремальной ультрафиолетовой литографии и мягкой рентгеновской микроскопии / Н.И.Чхало, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев // Журнал технической физики. – 2023. - Том 93. - Вып. 7. - С. 963-967.
- A 25. Mikhailenko M.S. Creation of Composite Optical Elements by the Ion-Beam Surface-Activation Method for Laser Applications / M.S. Mikhailenko, I. I. Kuznetsov,

I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O. V. Palashov, A. E. Pestov, M. V. Zorina, N. I. Chkhalo // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14. – No. 5. – P. 1016–1021.

Материалы конференций

T1. М.Н. Торопов, Н.Ф. Ерхова, С.Ю. Зуев, С.В. Кузин, И.П. Лобода, А.Я. Лопатин, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Цыбин, А.К. Чернышов, Н.И. Чхало / Изготовление и характеристика оптических элементов для солнечного телескопа ВУФ диапазона для наноспутников // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 612.

T2. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, А.Н. Орлова, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко/ Изучение формирующегося нарушенного слоя в монокристаллическом кремнии и его влияние на поведение шероховатости поверхности в процессе ионного травления // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – Т.1. – С. 488.

T3. Е.И. Глушков, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, И.Э. Шевчук / Формирование подложек для коллимирующей КБ-системы методами ионно-пучкового травления // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – Т.1. – С. 508.

Патенты

1. Михайленко М.С., Малышев И.В., Пестов А.Е., Торопов М.Н., Чернышев А.К., Чхало Н.И.; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»); Способ осесимметричной коррекции оптических деталей произвольной формы; Патент №2793080; Заявка № 202215627;

2. Пестов Алексей Евгеньевич, Малышев Илья Вячеславович, Михайленко Михаил Сергеевич, Торопов Михаил Николаевич, Чернышев Алексей Константинович, Чхало Николай Иванович.; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»); Способ формирования на поверхности оптических элементов астигматизма и более высоких порядков полиномов Цернике с коэффициентами $n=m$ ($m > 2$). Патент №2810680; Заявка № 2023125378;

Список литературы

1. Hoffman C., Giallorenzi T.G., Slater L.B. // Appl. Opt. 2015. Vol. 54. N 31. P. 268–F285.
2. Акопов А.К., Брычихин М.Н., Пластинин Ю.А., Ризванов А.А., Струля И.Л., Эйхорн Я.О., Малышев И.В., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // Космонавтика и ракетостроение. 2014. Т. 78. № 4. С. 77–85.
3. Wagner Ch., Harned N. // Nature Photon. 2010. Vol. 4. P. 24–26.
4. Wachulak P.W., Torrisi A., Bartnik A., Wegzynski L., Fok T., Patron Z., Fiedorowicz H. // Proc. SPIE. 2016. P. 10159.

5. Smertin R. M. et al. Influence of Mo interlayers on the microstructure of layers and reflective characteristics of Ru/Be multilayer mirrors //Optics Express. – 2022. – T. 30. – №. 26. – C. 46749-46761.
6. Makhotkin I. A. et al. Short period La/B and LaN/B multilayer mirrors for~ 6.8 nm wavelength //Optics express. – 2013. – T. 21. – №. 24. – C. 29894-29904.
7. Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Klunokov E.B., Prokhorov K.A., Salashchenko N.N., Zorina M.V., Schafers F., Shmaenok L.A. Short-period multilayer X-ray mirrors. Journal of Synchrotron Radiation. Vol. 10. Part 5. 2003. P. 358-360.;
8. S.M. Feng, G.L. Zhu, J.D. Shao, K. Yi, Z.X. Fan, X.M. Dou Co/CandW/Si multilayers deposited by ion-beamsputtering for the soft X-ray range, Appl. Phys. A 74, 553–555 (2002).;
9. F. Schafers Multilayers for the EUV/soft X-ray range, Physica B 283 (2000) 119-124.
10. S. A. Bogachev, N. I. Chkhalo, S. V. Kuzin, D. E. Pariev, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, S. V. Shestov, and S. Y. Zuev, Advanced materials for multilayer mirrors for extreme ultraviolet solar astronomy, Applied Optics Vol. 55, Issue 9, pp. 2126-2135 (2016).
11. Dinger, U., Bisert, F., Lasser, H. et al., “Mirror substrates for EUV lithography: progress in metrology and optical fabrication technology,” Proc. SPIE 4146, 35-46 (2000).
12. Wenlin Liao, Yifan Dai, Xuqing Nie, Xuhui Xie, and Ci Song. Rapid fabrication technique for nanometer-precision aspherical surfaces // Applied Optics Vol. 54, Issue 7, pp. 1629-1638 (2015).
13. Grove, W.R. On the electro-chemical polarity of gases. Phil. Trans. Roy. Soc. London. vol. 142. p. 87. (1852).
14. Wilson R. G. Ionic polishing of fused silica and glass //Optics Technology. – 1970. – T. 2. – №. 1. – C. 19-26.
15. Dev D. S. D., Krishna E., Das M. Development of a non-contact plasma processing technique to mitigate chemical network defects of fused silica with life enhancement of He-Ne laser device //Optics & Laser Technology. – 2019. – T. 113. – C. 289-302.
16. Zhou G. et al. Influence of ion beam figuring (IBF) on reflectivity of monocrystalline silicon //Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum. – SPIE, 2020. – T. 11427. – C. 1019-1024.
17. Xiao H. et al. Material removal and surface evolution of single crystal silicon during ion beam polishing //Applied Surface Science. – 2021. – T. 544. – C. 148954.

Подписано к печати 3 октября 2024 г.

Михайленко Михаил Сергеевич

Разработка аппаратуры и методов ионно-пучкового травления для получения высокоточных элементов рентгеновской оптики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 60 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"

603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино,
ул. Академическая, д. 7.