

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы (диссертации)

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

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Научная специальность: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Выполнил аспирант: Михайленко Михаил Сергеевич

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук:

Пестов Алексей Евгеньевич

дата: ____ июня 2023 г.

Нижний Новгород - 2023 г.

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 оптических элементов 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 нанодиагностики на основе микроскопии 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 преломляющая оптика, т. е. разработчики вынуждены использовать только зеркальные оптические элементы. Очевидно, что 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 аберраций 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 десятков процентов [5,6]. Тем не менее это существенно отличается от единицы, 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 стать асферическими, причем зачастую это очень сложная асферика четвертого, шестого и даже более высоких порядков [A24]. Это существенно усложняет их изготовление. Кроме того, для приближения к теоретическому пределу коэффициента

отражения, помимо качества самой многослойной структуры, существенное значение имеет шероховатость подложки, оказывающая значительное влияние на межслойную шероховатость структуры, и, как следствие, на величину коэффициента отражения. Поэтому задача развития новых методов обработки оптических поверхностей и поиск новых материалов, сочетающих в себе высокую точность съема материала, позитивное влияние на шероховатость, высокую производительность и низкую стоимость технологического процесса, является крайне актуальной.

В связи с прогрессом в технологии напыления многослойных зеркал нормального падения [7-10], стоит задача создания светосильной оптики дифракционного качества (под дифракционным качеством понимается то, что пространственное разрешение оптической системы определяется эффектами дифракции излучения, а не ошибками изготовления оптических элементов) для МР и ЭУФ диапазонов длин волн. Для достижения этих целей требуется существенное повышение качества оптических поверхностей, как с точки зрения точности их формы (допустимые среднеквадратичные (RMS) ошибки формы лежат в субнанометровом диапазоне), так и шероховатости (атомарного уровня) [11]. Такие точность и гладкость поверхности достигаются только при использовании ионно-пучковых технологий обработки оптических деталей на финальной стадии. Для этого чаще всего используются низкоэнергетичные ($E_{ион} < 1.5$ кэВ) пучки ускоренных ионов Ag, Ne и Xe.

В данной работе исследуется поведение шероховатости поверхности и коэффициентов распыления перспективных материалов для подложек оптических элементов рентгеновской оптики при воздействии ускоренными ионами. Также предложены методы сглаживания поверхности аморфных материалов и качественно продемонстрированы с помощью численного моделирования на предложенном алгоритме физического распыления. 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). Объяснено скачкообразное изменение поведения шероховатости поверхности монокристаллического кремния при увеличении энергии бомбардирующих ионов.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является изучение эволюции шероховатости поверхности и коэффициентов распыления перспективных материалов для подложек

оптических элементов рентгеновской оптики с целью создания методик и оборудования для формообразования и полировки пучками ускоренных ионов.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время все большее значение приобретают сверхточные и сверхгладкие поверхности, например, в области традиционной оптики [18-21], полупроводниковой технологии и более сложных оптических элементов, используемых для различных спектральных диапазонов (экстремального ультрафиолета (ЭУФ), мягкого рентгеновского излучения) или нейтронной оптики. В начале 1970-х годов во всем мире были предприняты усилия по разработке детерминированных технологий сверхточной обработки поверхностей для удовлетворения постоянно растущих требований к чрезвычайно высококачественным оптическим элементам. Одним из наиболее перспективных направлений предполагалось применение ионного травления, в связи с чем, произошёл бум публикаций, посвященных изучению процесса распыления при ионном травлении.

Переход в коротковолновый диапазон длин волн (ЭУФ, МР, ЖР) помимо повышения требований на точность формы поверхности, для обеспечения пространственного разрешения оптической системы на уровне, определяющемся критерием Рэллея, потребовал также и существенного повышения требований на гладкость, для обеспечения высоких (близких к теоретическому) коэффициентов отражения многослойных рентгеновских зеркал. Для этих целей необходимо обеспечить эффективную шероховатость во всем диапазоне пространственных частот (10^{-3} - 10^3 мкм⁻¹) лучше, чем 0.3 нм. На данный момент удовлетворить описанные требования возможно с помощью технологии ионно-пучковой обработки поверхности, позволяющими проводить процедуру финишной коррекции формы, в том числе, асферизацию и полировку поверхности до нанометровых и субнанометровых значений по среднеквадратичному отклонению поверхности от требуемой формы. Ионно-пучковые методы травления позволяют контролируемо удалять с поверхности малые толщины вещества, в частности, от параметров источника зависит величина съёма, которая может быть, как доли нанометров, так и единицы микрометров.

Современные исследования влияния ионного травления на морфологию поверхности оптических материалов (Si, SiO₂, ULE, ситалл и др.) направлены на поиск параметров, приводящих к сглаживанию поверхностной шероховатости в области средних и высоких пространственных частот.

Задачи диссертационной работы

Для достижения целей диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Изучение эволюции шероховатости поверхности и коэффициентов распыления аморфных материалов при облучении пучками ускоренных ионов различными газами.
2. Изучение эволюции шероховатости поверхности и коэффициентов распыления основных срезов монокристаллического кремния при облучении пучками ускоренных ионов различными газами.
3. Разработка и запуск стенда для проведения процедуры ионно-пучковой обработки поверхности оптических элементов.
4. Развитие методик ионной обработки поверхностей перспективных материалов для создания подложек и элементов рентгеновской оптики.

Научная новизна работы

Впервые в России реализованы возможности формирования оптических элементов с субнанометровой точностью формы, основой чему стало изучение влияния ионно-пучкового травления на шероховатость поверхности оптических материалов, таких как плавленый кварц и монокристаллический кремний. Данные материалы являются приоритетом современных исследований процесса финишной обработки поверхности [12-14]. В рамках работы впервые проведен глубокий анализ возможностей ионно-пучкового травления для создания технологии формирования прецизионных рентгенооптических элементов с атомарно гладкой поверхностью. Предложен ряд технологических покрытий, позволивших реализовать методику для 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 скачкообразного изменения поведения зависимости высоты шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии бомбардирующих ионов.

Впервые изучена структура и свойства приповерхностного “нарушенного” слоя, формирующегося в процессе ионной бомбардировки из-за имплантации и каскада столкновений, и его влияние на ростовые и отражательные характеристики многослойных зеркал, в частности на зеркала на основе Be, оптимизированных на длину волны 11.2 нм.

Разработана установка ионно-пучкового и реактивного ионно-пучкового травления, позволившая реализовать методики ионной коррекции формы, асферизации и полировки при воздействии на поверхность пучков ускоренных ионов инертных и активных газов. Примененный в установке источник с фокусировкой ионного пучка обладает рекордными для данных задач характеристиками.

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 своего класса параметрами. Фокусирующая ионно-оптическая система позволила получить минимальный размер ионного пучка (ширина на полувысоте до 1,5 мкм) без обрезавших пучок диафрагм, что при токе ионов до 2 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 локальной коррекции ошибок формы малоразмерным ионным пучком.

Создан ряд рентгенооптических 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); кристалл-монокроматор для линии Nuclear Resonance Beamline (ID18) синхротрона 4го поколения European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Гренобль, Франция) и др.

Методология и методы исследования

В работе использованы апробированные методики, развитые и применяемые в ИФМ РАН г. Нижний Новгород, Россия. Также в рамках работы были развиты существующие методики полировки и коррекции формы пучками ускоренных ионов.

- Измерения и вычисление значения эффективной шероховатости поверхности методом атомно-силовой микроскопии и построение PSD-функций.
- Измерение глубины травления методом интерферометрии белого света.
- Измерение сферической формы поверхности методом интерферометрии с дифракционной волной сравнения.
- Измерение плоской формы поверхности на интерферометре Физо с эталонной поверхностью.
- Измерение нарушенного слоя методом малоуглового диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения с длиной волны 0.154 нм.
- Измерение приповерхностного слоя методом комбинационного рассеяния света с длинами волн 514.5 нм и 325 нм.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обработка поверхности плавленого кварца параллельным пучком ускоренных ионов инертных газов (Ar, Xe, Ne) позволяет формировать рентгенооптические элементы дифракционного качества с шероховатостью менее 0.3 нм в диапазоне пространственных частот $q=[4.9 \cdot 10^{-2}-6.3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1}]$ с числовой апертурой до 0.6.
2. Применение энергии ионов аргона с энергией 1250 эВ позволяет сглаживать шероховатости в области высоких пространственных частот $10^0-10^3 \text{ мкм}^{-1}$ на поверхности плавленого кварца при съёме материала более 1 мкм.
3. Из-за частичной аморфизации приповерхностного слоя происходит скачкообразное изменение поведения зависимости высоты шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии бомбардирующих ионов.
4. Технологическое покрытие из аморфного кремния позволяет формировать высокотражающие рентгенооптические элементы на подложках из бериллия.
5. Разработанный миниатюрный источник с фокусирующей ионно-оптической системой, накальным нейтрализатором и водоохлаждаемым кожухом позволяет проводить финишную коррекцию ошибок формы поверхностей оптических элементов и доведения её до субнанометровой точности по параметру RMS в диапазоне пространственных частот вплоть до $4.1 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$ без критического нагрева образца.

6. Моделирование процессов физического распыления методом Монте-Карло, учитывая только парные столкновения, позволяет предсказывать угловую и энергетическую зависимость коэффициента распыления для однокомпонентных мишеней.
7. Моделирование процессов физического распыления методом Монте-Карло, с учетом угловой зависимости для коэффициента распыления, позволяет качественно предсказывать эволюцию поверхности аморфного кремния.

Публикации по теме

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 82 работы. Опубликовано 31 статья в научных журналах [A1-A31] и 50 материалов в сборниках конференций и тезисов докладов [T1-T50], также одно авторское свидетельство [П1].

Личное участие автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, подготовка и исследование образцов, 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++.

Апробация результатов

Все работы были представлены в реферируемых научных и специализированных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в данной диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях, симпозиумах и совещаниях:

1. Изучение и методика коррекции оптических элементов из плавленого кварца ионами аргона в диапазоне энергий до 1.5 кэВ были представлены на международном симпозиуме «Наноп физика и нанoeлектроника» Нижний Новгород в 2019 году.
2. Демонстрация сглаживающих свойств и 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.

3. Модернизация миниатюрного источника ускоренных ионов обсуждалась на международном симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника» Нижний Новгород в 2019 и 2020 году.
4. Особенности поведения шероховатости поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионном травлении представлялась и обсуждалась на международном симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника» Нижний Новгород в 2021, 2022 и 2023 годах, «Рентгеновская оптика – 2021», г. Черноголовка, 2021 году, а также на школе «Современная рентгеновская оптика» в 2022.
5. Результаты по развитию методик симметричной коррекции широкоапертурным ионным пучком, в частности описание алгоритма было представлено на международном симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника» Нижний Новгород в 2021.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложена на 194 страницах, содержит 112 рисунков и 7 таблиц.

Содержание работы по главам

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 объём диссертации и публикации по теме в журналах и сборниках.

В первой главе приводится обзор литературы по ионно-пучковому травлению, в котором отражены основные моменты ионно-пучкового травления в контексте модификации формы и шероховатости поверхности твердых тел. Описаны принципы работы источников ускоренных ионов для проведения процедуры коррекции формы поверхности оптических элементов. Также приводится обзор работ по существующим моделям для расчёта значений коэффициентов распыления и приведены программные пакеты, использующие эти модели. Рассмотрены модели, описывающие эволюцию поверхности. Заканчивается глава описанием требований для оптических элементов современной рентгеновской оптики.

Во второй главе в первом пункте описана аппаратура для изучения ионного травления мишеней. Во втором пункте основное внимание уделено методам и инструментам для

измерения шероховатости поверхности, нарушенного слоя и коэффициента распыления. В частности, описан метод измерения глубины травления с помощью интерферометрии белого света и способ вычисления значения коэффициента распыления. Приводится описание измерения и вычисления значения шероховатости поверхности методами атомно-силовой микроскопии и с помощью малоуглового диффузного рассеяния жесткого рентгеновского излучения, который также применялся для изучения нарушенного слоя. Приведены результаты изучения аморфных материалов, в частности, плавный кварц и плёнки бериллия, из которых были определены оптимальные параметры для сглаживания шероховатости поверхности, а именно, определены значения энергий ионов аргона (1250 эВ), углы падения ($0^\circ - 35^\circ$), а также показано, что травления на глубину 1 мкм является достаточным для выхода значения шероховатости на насыщение. Рассмотрено поведение шероховатости также и поликристаллического бериллия.

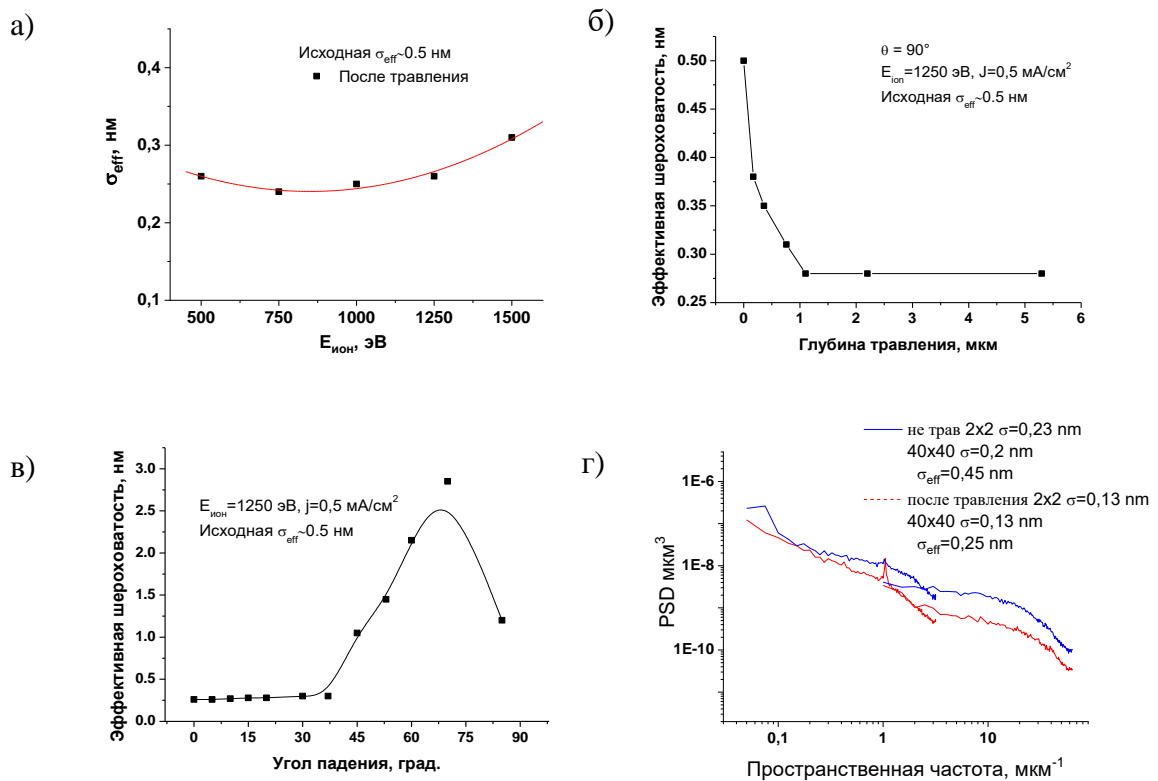


Рис.1. Зависимости значения эффективной шероховатости поверхности плавного кварца от энергии ионов (а); от глубины травления (б); от угла падения ионов (в); PSD-функция поверхности до и после травления ионами аргона с энергией 1250 эВ (г).

Изучены угловые и энергетические зависимости основных срезов монокристаллического кремния при травлении инертными газами (Ar, Ne, Xe). Обнаружен и объяснён механизм скачкообразного поведения значения шероховатости поверхности.

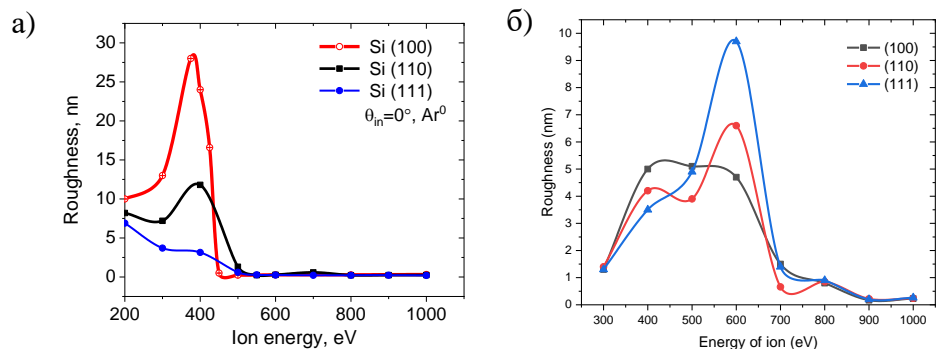


Рис.2 Зависимости значения эффективной шероховатости поверхности основных срезов монокристаллического кремния от энергии распыляющих ионов аргона и ксенона.

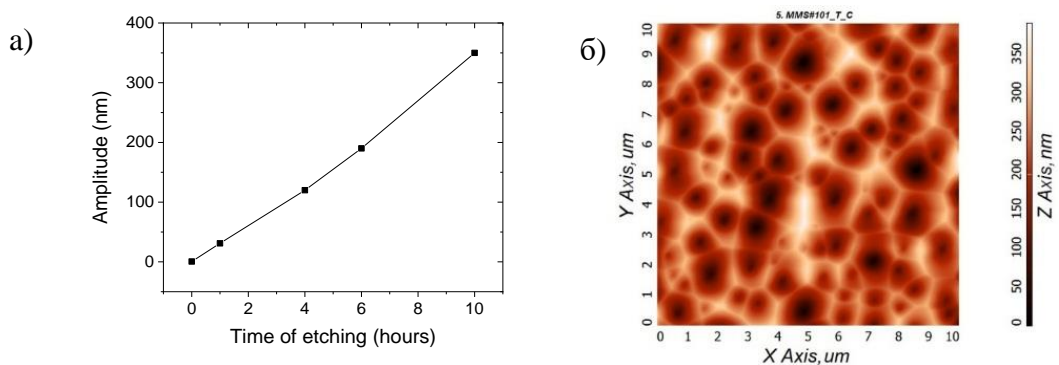


Рис.3. Зависимость амплитуды неоднородностей от времени травления (а); АСМ кадры поверхности после 10 часов (б) ионного травления.

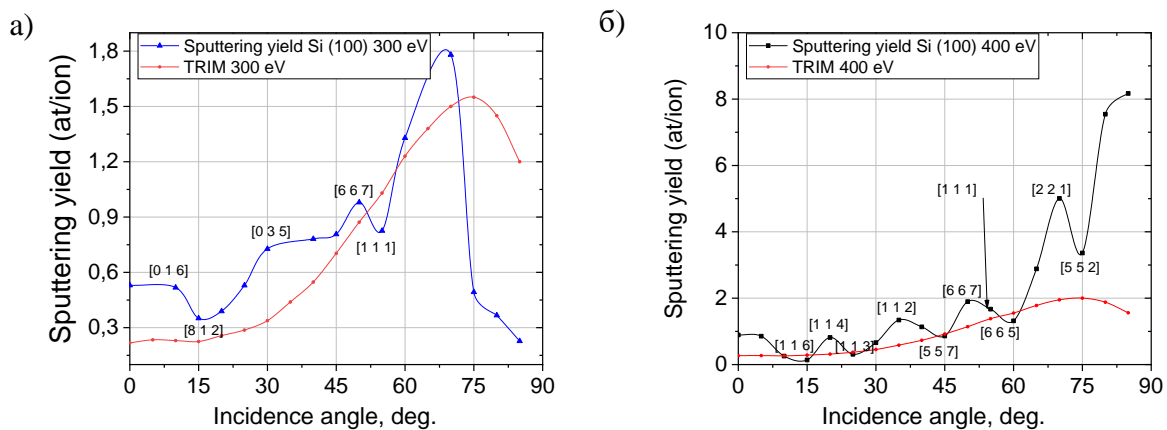


Рис. 4. Зависимость коэффициента распыления Si <100> от угла падения $E_{ион}$ - 300 эВ (а) и 400 эВ (б). Параметры эксперимента: ионы – Ar^0 ; $J=0,7$ mA/cm^2 ; глубина травления ~ 2 мкм.

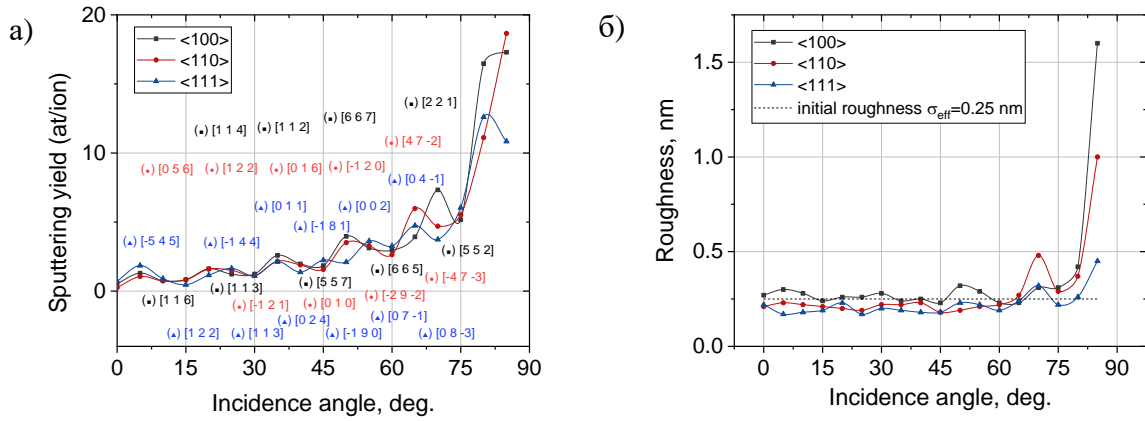


Рис. 5. Зависимость коэффициента распыления (а) и шероховатости поверхности (б) Si <100>, <110> и <111> от угла падения $E_{\text{ион}}=800$ эВ; Параметры эксперимента: ионы – Ar^0 ; $J=0,7$ mA/cm^2 ; глубина травления ~ 2 μm .

Метод комбинационного рассеяния (КР) показал, что при энергии ионов превышающей пороговое значение, которое для каждого сорта иона и кристаллографической ориентации мишени различаются, в приповерхностном слое образуется аморфная фаза (рис.б) глубиной $\sim 3-5$ nm , которая, как показано в работе [А8] хорошо поддается ионной полировке.

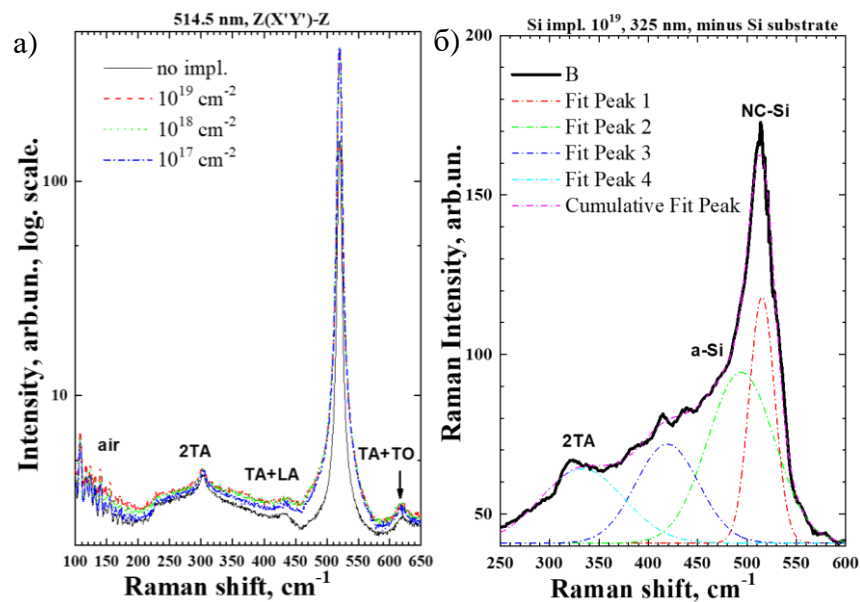


Рис.6. Спектры КР имплантированной поверхности Si ионами Ar^+ , при длине волны возбуждения 514.5 nm (а); при длине волны возбуждения 325 nm с максимальной дозой 10^{19} $\text{ион}/\text{cm}^2$ (б). Поляризация рассеянного света не анализировалась.

Кроме того, в главе 2 также приводятся результаты исследования реактивного ионно-пучкового травления плавленого кварца смесью газов $\text{Ar}+\text{CF}_4$ в соотношении 1:1, из которых следует, что добавление химически активного газа CF_4 позволит увеличить

скорость травления более чем в 5 раз, обеспечивая при этом шероховатость поверхности на приемлемом для рентгенооптических приложений уровне. Для всех вышеописанных материалов определены оптимальные параметры для проведения процедуры ионно-пучковой коррекции формы, с сохранением или сглаживанием шероховатости поверхности.

В третьей главе описаны методики коррекции формы поверхности оптических элементов с применением ионно-пучкового травления. Описан метод, на основе которого реализована программа для расчёта формирующих диафрагм (масок) для симметричной коррекции формы, в том числе для равномерного съёма материала, который находит применение, например, для полировки поверхности диаметром мишени равным двум диаметрам пучка ионов. Метод основан на свёртке распределения тока в пучке ионов с требуемым профилем поверхности оптического элемента.

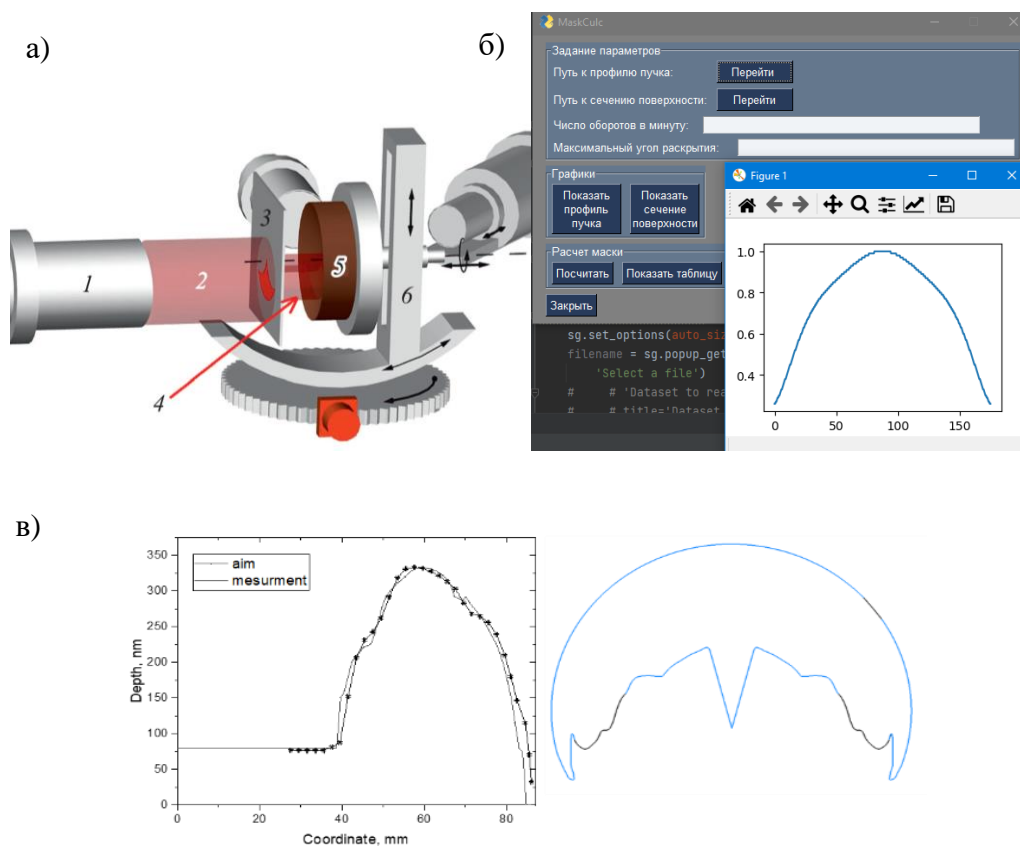


Рис.7. а) Схема эксперимента по осесимметричной обработке поверхности: 1 — широкоапертурный источник ионов; 2 — квазипараллельный ионный пучок; 3 — формирующая диафрагма; 4 — ионный пучок после диафрагмы; 5 — образец; 6 — гониометр; б) интерфейс разработанной программы MaskCulc; в) слева – полученный профиль (черные точки) поверхности; справа – форма маски.

Описан принцип локальной коррекции ошибок формы поверхности, реализованный в ИФМ РАН. Предложены технологические покрытия для поверхностей, не поддающихся механической и ионной полировки, испытанные на плёнках и массивном бериллии. Применение тонких пленок кремния на поверхности бериллия с последующим их травлением ионами аргона с энергией 800 эВ приводит к существенному сглаживанию шероховатости поверхности в широком диапазоне пространственных частот $0.049-60 \text{ мкм}^{-1}$. В частности, с помощью травления Si пленки на Be удалось улучшить эффективную шероховатость поверхности со значения $\sigma_{\text{эфф.}}=1.37 \text{ нм}$ до $\sigma_{\text{эфф.}}=0.29 \text{ нм}$, характерную для суперполированных подложек применяемых, в том числе, и для рентгенооптических задач. Тонкая, 200 нм, пленка кремния обеспечивает хороший теплоотвод от поверхности и сильно не влияет на теплофизические характеристики зеркал.

В четвертой главе описаны две установки, разработанные и собранные на базе исследований, проведенных в предыдущих главах для проведения локальной коррекции ошибок формы и для симметричной обработки поверхности, в том числе и с использованием химически-активных газов. Большое внимание уделено разработке и модернизации миниатюрного источника ускоренных ионов с фокусирующей ионно-оптической системой (ИОС), характеристики которого являются рекордными по плотности тока для своего класса источников, а именно, размер пучка до 1.5 мм и плотность тока до 95 мА/см^2 .

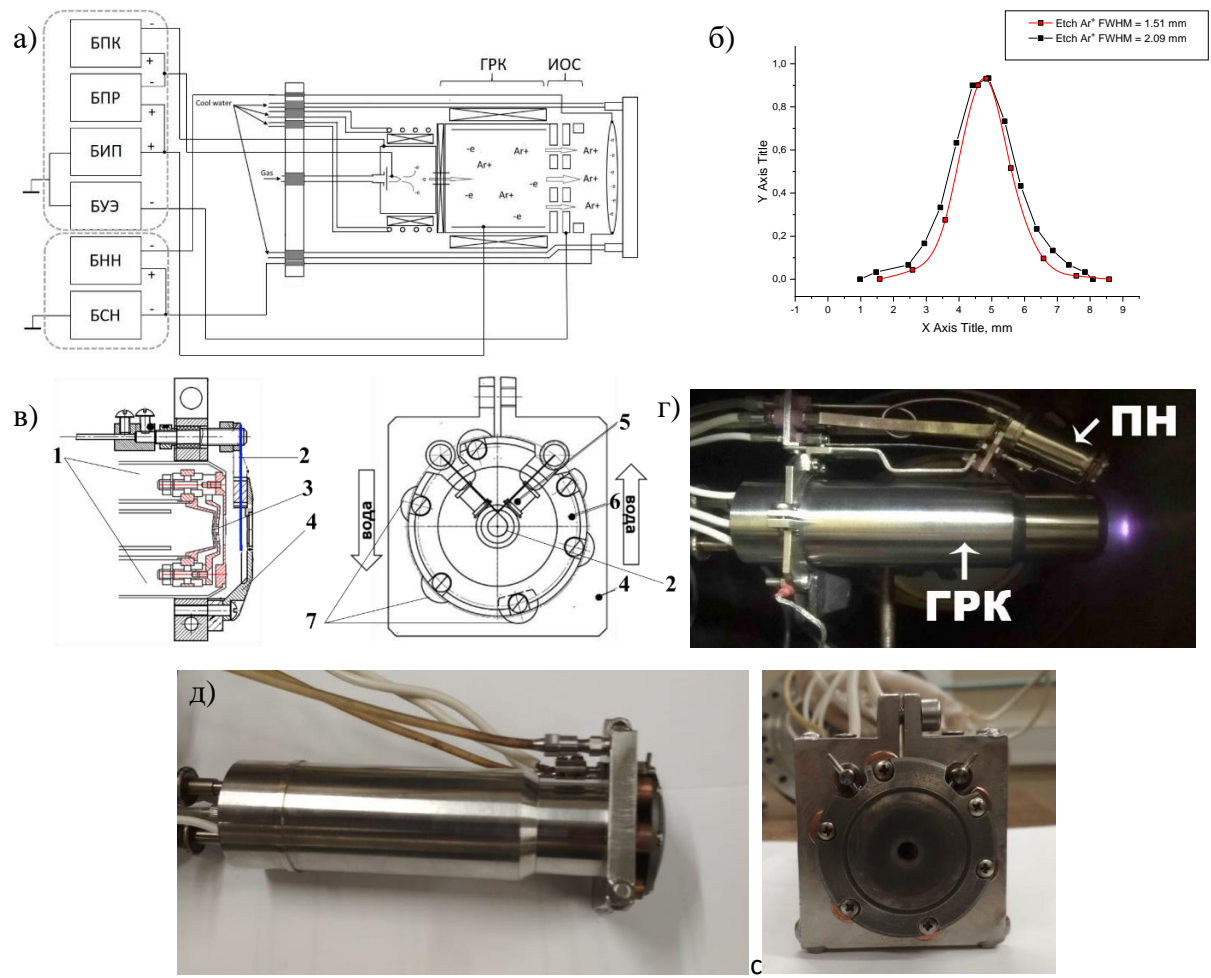


Рис.8. Схема миниатюрного источника ускоренных ионов КЛАН-12М (а); профили пучка ионов аргона (с энергией 1200 эВ) с включенным и выключенным термокатодом (б); схема защитного кожуха с термокатодом для компенсации пространственного заряда пучка ионов (в); фото работы источника ускоренных ионов с плоской ИОС и плазменным нейтрализатором (г); фото ионного источника с фокусирующей ИОС и кожухом для работы с диэлектрическими мишенями (д).

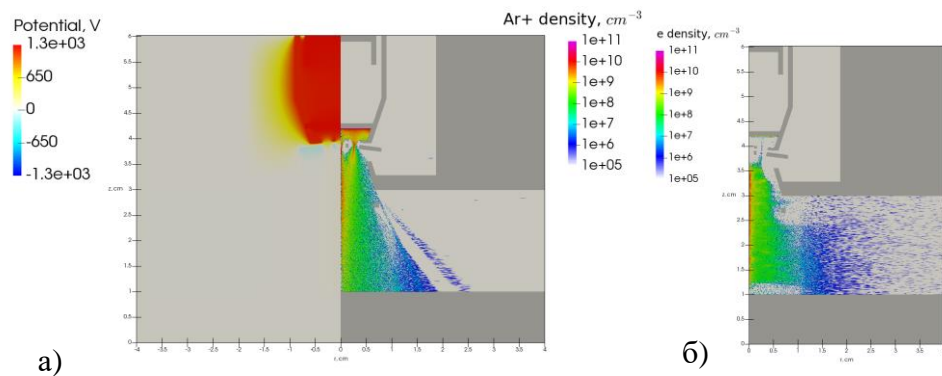


Рис.9. Распределение плотности ионов и потенциалов в пространстве (а); распределение плотности электронов в пространстве (б).

Также с помощью численного моделирования объяснён механизм уширения пучка ионов при использовании термокатода нейтрализатора (рис.9). При моделировании было обнаружено, что примерно 10% электронов, испущенных нейтрализатором, затягиваются внутрь газоразрядной камеры (ГРК) через ИОС. При этом энергия электронов, попадающих в ГРК с нейтрализатора, равняется 1210 эВ. Т.е. один такой электрон может производить большее количество ионизаций в газоразрядной камере. Таким образом, включение электронного тока с термокатода приводит к дополнительной ионизации в газоразрядной камере. Это приводит к увеличению ионного потока вытягиваемого ИОС из ГРК. Большой ионный поток приводит к большему потенциалу плазмы, образующейся ниже ИОС (рис.9), что в свою очередь приводит к увеличению пространственного заряда ионного пучка в области перетяжки и, как следствие, уширению ионного пучка.

С помощью разработанных методик и оборудования были изготовлены высокоточные оптические элементы дифракционного качества, как пример, зеркало М1 для ЭУФ микроскопа (рабочая длина волны $\lambda = 13.88$ нм). Наиболее важным элементом микроскопа, определяющим его разрешающую способность, является объектив. В качестве проекционного объектива использовалась схема Шварцшильда. Применение симметричной коррекции (описанной в главе 3) позволило снизить RMS поверхности с 6.5 нм до 3.1 нм (рис.10).

Форма асферического зеркала описывается полиномом:

$$z(r = 0:50) = \frac{(1/137) \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1/137)^2 r^2}} + \alpha_2 \cdot r^2 + \alpha_4 \cdot r^4 + \alpha_6 \cdot r^6 + \alpha_8 \cdot r^8 + \alpha_{10} \cdot r^{10} \quad (1)$$

где $\alpha_2 = -1.919 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_4 = 7.3144 \cdot 10^{-10}$, $\alpha_6 = 3.9214 \cdot 10^{-14}$, $\alpha_8 = 1.7221 \cdot 10^{-18}$, $\alpha_{10} = -1.4635 \cdot 10^{-22}$.

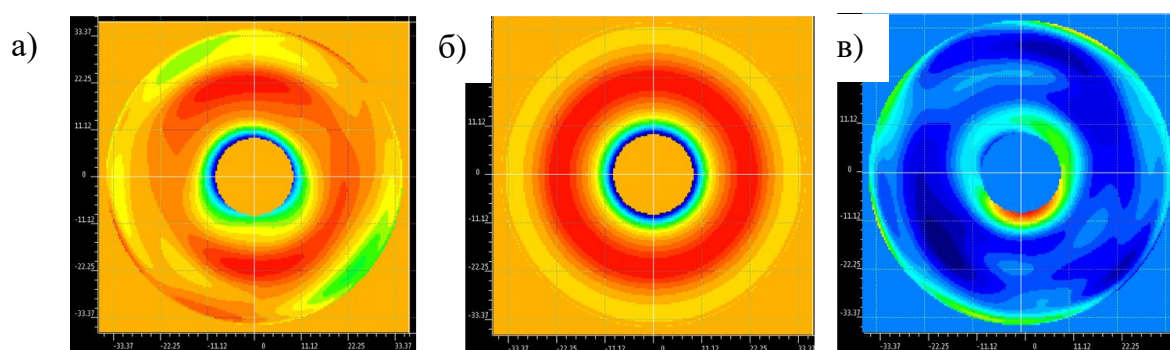


Рис.10. а) Карта ошибок формы исходной поверхности с параметрами: PV = 52 нм, RMS = 6.5 нм; б) Симметричная ошибка формы; в) Карта ошибок формы корректированной поверхности с параметрами: PV = 23 нм, RMS = 3.1 нм.

Разрешение микроскопа определяется ошибками формы зеркал объектива. Измерение aberrаций для их коррекции происходило в интерферометре с дифракционной волной сравнения, работающем в фазовом режиме регистрации. Коррекция aberrаций зеркала M1 осуществлялась с помощью ионного пучка с минимальным диаметром 2 мм.

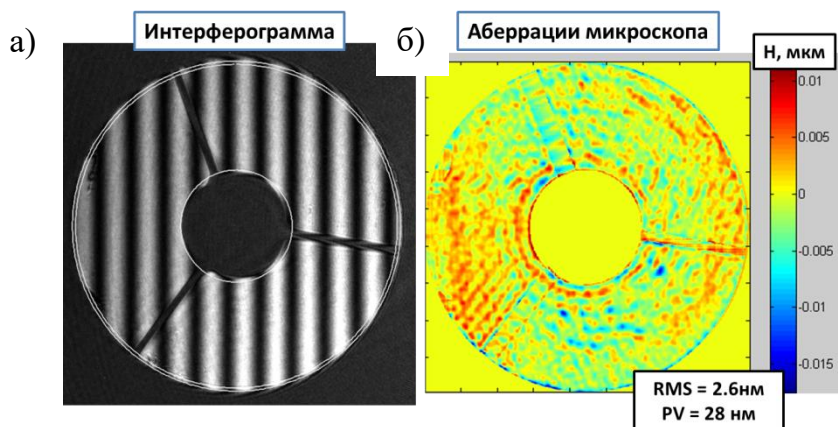


Рис.11. После финальных коррекций M1 и напыления отражающих многослойных покрытий: а) интерферограмма объектива; б) aberrации объектива.

После финальной коррекции формы M1, была получена интерферограмма (рис. 11а). Измеренные aberrации объектива составили 2.6 нм по параметру RMS (рис. 11б), т.е. лучше $\lambda/5$.

В пятой главе уклон сделан на теоретическую модель описания процесса физического распыления с учетом эволюции поверхности. Предложенный алгоритм SPnSurface, реализован на основе метода Монте-Карло для трёхмерного случая распыления поверхности аморфного гомогенного твёрдого тела. Также приводятся результаты моделирования: зависимости коэффициента распыления и шероховатости поверхности для аморфного кремния и ионов аргона, которые сравниваются с полученными экспериментально. 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 .

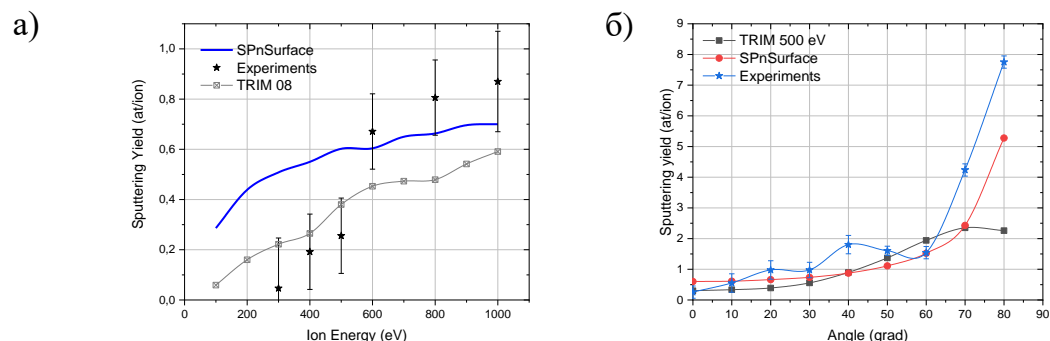


Рис. 12. Сравнение энергетической (а) и угловой (б) зависимости коэффициента распыления аморфного кремния ионами аргона с экспериментом и расчётом в пакете SRIM/TRIM [15,16].

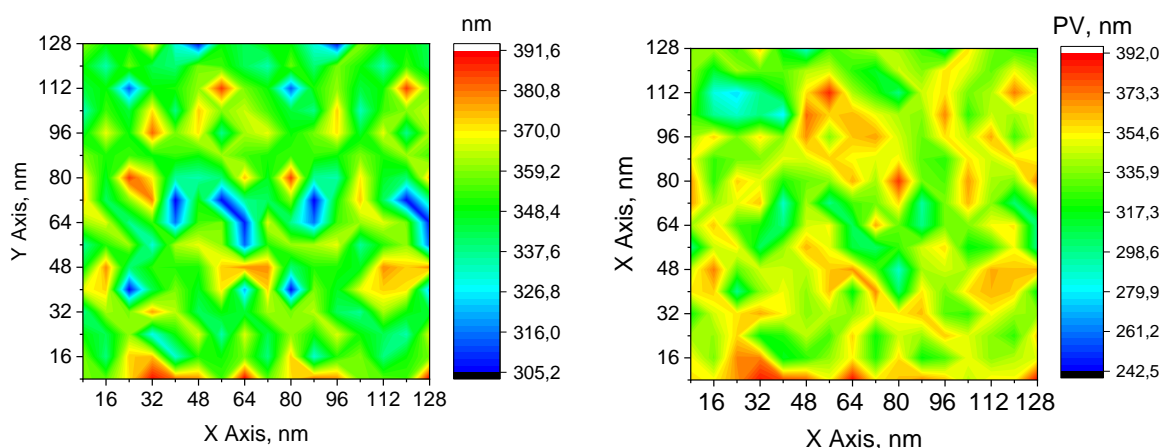


Рис.13. Карта 128x128 нм исходной поверхности кремния $\sigma_{\text{eff}}=0.34$ нм и после травления ионами аргона с энергией 800 эВ под нормалью к поверхности $\sigma_{\text{eff}}=0.31$ нм.

После моделирования облучения поверхности Si ионами Ag с энергией 800 эВ под нормалью, эффективная шероховатость снизилась до значения $\sigma_{\text{eff}}=0.31$ нм (исходная $\sigma_{\text{eff}}=0.34$ нм) в диапазоне пространственных частот $7.81 \cdot 10^{-3} - 6.25 \cdot 10^{-2} \text{ нм}^{-1}$. Травление под углом часто сопровождается развитием рельефа и образованием артефактов на поверхности что приводит к ухудшению шероховатости [17]. В нашем случае моделировалось травление ионами аргона с энергией 800 эВ под углом 60 градусов к поверхности в результате которого значение эффективной шероховатости выросло до 0.37 нм.

Для проверки модели был проведен ряд экспериментов с теми же значениями энергий и углов падения ионов на поверхность образца. Образец Si#1 соответствует исходной поверхности; Si#2 – облученная ионами аргона с энергией 800 эВ под углом 60 градусов; Si#3 – облученная ионами аргона с энергией 800 эВ под нормалью.

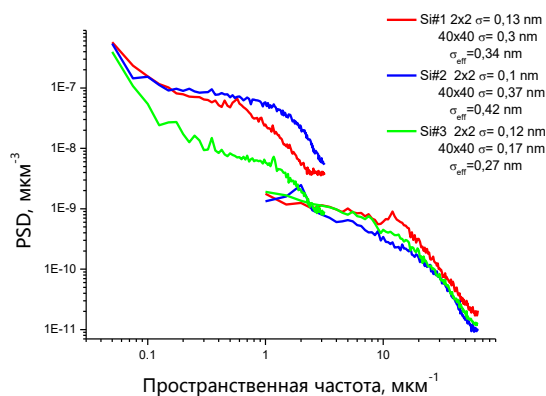


Рис.14. PSD-функции поверхностей Si, подвергнутых бомбардировке ускоренными ионами Ag с энергией 800 эВ.

Таким образом реализован алгоритм, моделирующий процесс ионного травления инертными газами с учетом эволюции поверхности, который позволяет рассчитать значение коэффициента распыления, и, качественно, предсказать поведение шероховатости поверхности аморфного гомогенного твёрдого тела. Алгоритм опубликован в [A22].

Основные результаты

1. 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 0.6 и с шероховатостью поверхности лучше 0.3 нм, что удовлетворяет требованиям современной рентгеновской оптики.
2. Изучено поведение коэффициентов распыления основных срезов монокристаллического кремния при облучении ускоренными ионами Ar, Ne, Xe. Обнаружено скачкообразное поведения шероховатости поверхности в зависимости от энергии, которое объясняется появлением квазиаморфной фазы монокристаллического кремния в приповерхностном слое $\sim 1-3$ нм. На основе полученных результатов разработана методика коррекции формы монокристаллического кремния и изготовлен кристалл-монохроматор из Si (110) для

линии Nuclear Resonance Beamline (ID18) синхротрона 4го поколения European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, Гренобль, Франция).

3. Развита методика осесимметричной коррекции формы высокоточных оптических элементов квазипараллельным ионным пучком для приложений современной рентгеновской оптики, в частности, реализован алгоритм на языке программирования Python для вычисления формирующего требуемый профиль поверхности масок.
4. Разработан, собран и испытан источник ускоренных ионов с фокусирующей ионно-оптической системой на базе технологического источника КЛАН-10М. Рабочие параметры источника позволяют получить в области перетяжки пучок с сечением шириной 1.5 мм на полувысоте для случая с выключенным термокатодом-нейтрализатором и 2.09 мм в случае с включенным термокатодом-нейтрализатором. Это соответствует значениям плотности ионного тока до 94.9 mA/cm^2 , а скорость травления плавного кварца при этом составляет вплоть до 800 нм/мин. Важной характеристикой источника является широкий диапазон изменений размера ионного пучка. Это достигается за счет изменения величин ускоряющего напряжения и ионного тока в пучке, а также расстояния источник-образец. Источник позволяет проводить глубокую финишную коррекцию ошибок формы поверхностей оптических элементов и доведения её до субнанометровой точности по параметру RMS в диапазоне пространственных частот вплоть до $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$ для случая проводящих и до $9.5 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$ для случая диэлектрических деталей.
5. Предложен и реализован на языке программирования C++ алгоритм SPnSurface, представляющий собой импульсный механизм физического распыления с учетом эволюции поверхности. Предложенный алгоритм, реализован на основе метода Монте-Карло для трёхмерного случая распыления поверхности аморфного гомогенного твёрдого тела. Результаты численного моделирования энергетической зависимости коэффициента распыления и поведения шероховатости для аморфного кремния и ионов аргона качественно совпадают с наблюдаемыми в экспериментах, угловые зависимости коэффициента распыления количественно совпадают с экспериментом в диапазоне углов 0-60°.

Список публикаций автора

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 (<https://doi.org/10.1364/AO.55.001249>).

- A2.** M.S. Mikhailenko, D.S. Sidorov, N.I. Chkhalo, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov. Sputtering of carbon using hydrogen ion beams with energies of 60–800 eV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Volume 387, 15 November 2016, Pages 73-76 (<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.007>).
- A3.** M.S. Mikhailenko, M.V. Zorina, S. Yu. Zuev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. The diffraction efficiency of echelle gratings increased by ion-beam polishing of groove surfaces // Technical Physics Letters volume 42, 2016, pages 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 (<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004>).
- 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 (<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.023>).
- A6.** M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, A.V. Kirsanov, G.A. Luchinin, O.A. Malshakova, A.I. Pavlikov, A.E. Pestov, M.V. Zorina. Polishing the surface of a z-cut KDP crystal by neutralized argon ions // Applied Optics Vol. 57, Issue 24, 2018, pp. 6911-6915 (<https://doi.org/10.1364/AO.57.006911>) .
- A7.** 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. X-ray scattering by the fused silica surface etched by low-energy Ar ions // Journal of X-Ray Science and Technology, vol. 27, no. 5, 2019, pp. 857-870.
- A8.** 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. Effect of ion beam etching on the surface roughness of bare and silicon covered beryllium // Proceedings Volume 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V; 102350M (2017) <https://doi.org/10.1117/12.2269312>
Event: SPIE Optics + Optoelectronics, 2017, Prague, Czech Republic
- A9.** M.S. Mikhailenko, M.V. Zorina, D.E. Pariev, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, I.L. Strulya, S.A. Churin, N.I. Chkhalo. The effect of bombardment with neutralized neon ions on the roughness of a fused silica and beryllium surface // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques volume 11, 2017, pages 485–489.

- A10.** 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. Ultrasmooth beryllium substrates for solar astronomy in extreme ultraviolet wavelengths // Applied Optics. Vol. 58, No. 13. (2019). (DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.58.003652>).
- A11.** M.S. Mikhailenko, M. V. Zorina, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov, A. E. Pestov, N. I. Chkhalo. Material Surface Treatment for Design of Composite Optical Elements // Technical Physics, Vol. 65, No. 11, pp. 1828–1831. (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110286.
- A12.** 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. Modification and Polishing of the Holographic Diffraction Grating Grooves by a Neutralized Ar Ion Beam // Technical Physics, Vol. 65, No. 11, pp. 1780–1785. (2020).
- A13.** 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. Ion-Beam Methods for High-Precision Processing of Optical Surfaces // Technical Physics, Vol. 65, No. 11, pp. 1837–1845. (2020). (<https://doi.org/10.1134/S1063784220110274>).
- A14.** M.S. Mikhailenko, A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements // Precision Engineering Vol. 69, pp. 29–35. (2021).(<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.006>).
- A15.** M.S. Mikhailenko, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O. V. Palashov, A. E. Pestov, M. V. Zorina, N. I. Chkhalo. Creation of Composite Optical Elements by the Ion-Beam Surface-Activation Method for Laser Applications // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, Vol. 14, No. 5, pp. 1016–1021. (2020).(<https://doi.org/10.1134/S1027451020050316>).
- A16.** M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, L.A. Goncharov. Miniature Ion Source KLAN-10M with a Plasma Neutralizer // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, V.13, 2019, pp182–187.
- A17.** M.S. Mikhailenko, A. Pestov, N. Chkhalo, L. Goncharov, A. Chernyshev, I. Zabrodin, I. Kaskov, P. Krainov, D. Astakhov, V. Medvedev. Miniature source of accelerated ions with focusing ion-optical system // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 11 September 2021, Volume 1010, 165554. (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165554>).
- A18.** М.Н. Торопов, А.А. Ахсаляян, И.В. Мальшев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало. «Линзовый корректор волнового фронта для изучения плоских поверхностей» // Журнал технической физики, 2021, том 91, вып. 10, с.

1583-1587. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51374.108-21.

A19. M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, M.V. Zorina, A.K. Chernyshev, N.N. Salashchenko, I.I. Kuznetsov. 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 // *Applied Optics* 61, 10, (2022).

A20. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, А.А. Перекалов, М.В. Зорина, Н.И. Чхало. Перспективы применения реактивного ионно-пучкового травления плавленого кварца смесью тетрафторметана и аргона для асферизации поверхности оптических элементов. *Журнал технической физики*, 2022, том 92, вып. 8

A21. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко. Изучение влияния энергии ионов аргона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния. *Журнал технической физики*, 2022, том 92, вып. 8.

A22. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало. Модель физического распыления аморфных материалов. *Журнал технической физики*, 2022, том 92, вып. 8.

A23. N. Kumar, V.A. Volodin, S.V. Goryainov, A.K. Chernyshev, A.T. Kozakov, A.A. Scrbabin, N.I. Chkhalo, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, M.V. Zorina. Raman scattering studies of low energy Ar⁺ ion implanted monocrystalline silicon for synchrotron applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 534 (2023) 97–102.

A24. 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. High-aperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography. *Optics Express* Vol. 30, No. 26 47567 (2022).

A25. 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. (DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52790.85-22).

A26. Aleksei Chernyshev, Nikolay Chkhalo, Ilya Malyshev, Mikhail Mikhailenko, Alexey Pestov, Nikolay Salashchenko, AND Mikhail Toropov. Axisymmetric surface shape correction of optical elements by a wide-aperture ion beam. Vol. 61, No. 33 / 20 November 2022 / *Applied Optics*. <https://doi.org/10.1364/AO.472504>.

A27. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко. Изучение влияния энергии ионов неона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионном травлении // Журнал технической физики, 2023, том 93, вып. 7.

A28. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало. Изучение угловых зависимостей скоростей ионно-пучкового распыления металлов для синтеза заготовок фотошаблонов // Журнал технической физики, 2023, том 93, вып. 7.

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., Wegrzynski 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. – Т. 30. – №. 26. – С. 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. – Т. 21. – №. 24. – С. 29894-29904.
7. Andreev S.S., Bibishkin M.S., Chkhalo N.I., Kluev 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. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Ziegler J F and Manoyan J M 1988 Nucl. Instrum. Methods B 35 215–28.
16. Biersack J P and Haggmark L G 1980 Nucl. Instrum. Methods 174 257–69.
17. Qiangmin Wei et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 41(2008) 172002.
18. Tang W., Deng W., Yin X. Ion beam figuring high gradient optical aspherical surface //9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Subdiffraction-limited Plasmonic Lithography and Innovative Manufacturing Technology. – SPIE, 2019. – T. 10842. – C. 176-183.;
19. Wang Z. et al. Application of flow field analysis in ion beam figuring for ultra-smooth machining of monocrystalline silicon mirror //Micromachines. – 2022. – T. 13. – №. 2. – C. 318.;
20. Hand M. et al. Ion beam figuring and optical metrology system for synchrotron x-ray mirrors //Advances in Metrology for X-Ray and EUV Optics VIII. – SPIE, 2019. – T. 11109. – C. 51-57.;
21. Wang G. et al. Correction of different spatial frequency errors of large and thin optical windows based on ion beam figuring //International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application. – SPIE, 2020. – T. 11617. – C. 568-577.