

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии
наук"

На правах рукописи

Чернышев Алексей Константинович

**«РАЗВИТИЕ ИОННО-ПУЧКОВЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ
ВЫСОКОТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ»**

Научная специальность: 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
Пестов Алексей Евгеньевич

Нижний Новгород - 2025 г.

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор существующих методов формирования оптических элементов дифракционного качества.....	14
<i>1.1. Механическая обработка/полировка подложек рентгеновских зеркал.....</i>	<i>16</i>
<i>1.2. Методы локальной обработки.....</i>	<i>18</i>
<i>1.2.1. Магнитореологическая обработка.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2. Струйная полировка.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.3. Магнетронное осаждение.....</i>	<i>21</i>
<i>1.2.4. Ионно- пучковая обработка.....</i>	<i>22</i>
<i>1.3. История и принципы IBF.....</i>	<i>25</i>
<i>1.3.1. Развитие IBF: с 1980-х годов по настоящее время.....</i>	<i>25</i>
<i>1.3.2. Принципы проведения ионно-пучковой обработки.....</i>	<i>26</i>
<i>1.4. Проблемы, связанные с коррекцией локальных ошибок формы.....</i>	<i>30</i>
<i>1.4.1. Проблемы позиционирования.....</i>	<i>31</i>
<i>1.4.2. Метрология.....</i>	<i>33</i>
<i>1.4.3. Расчет обработки.....</i>	<i>34</i>
<i>1.5. Требования к методике IBF.....</i>	<i>37</i>
Глава 2. Установка ионно-пучковой обработки оптических элементов.....	38
<i>2.1 Исследование распыления рентгенооптических материалов.....</i>	<i>38</i>
<i>2.1.1 Исследование монокристаллического кремния.....</i>	<i>40</i>
<i>2.1.2 Изучение распыления монокристаллического кремния от угла падения ионов.....</i>	<i>46</i>
<i>2.1.3 Исследование распыления монокристаллического сапфира.....</i>	<i>48</i>
<i>2.1.4 Результаты исследования распыления монокристаллического кремния и сапфира.....</i>	<i>52</i>
<i>2.2 Разработка технологической установки ионно-пучкового травления.....</i>	<i>52</i>

2.2.1. Описание стола для образцов и системы позиционирования	54
2.2.2. Ионные источники.....	56
2.2.3. Исследование функции удаления материала ионными источниками	60
Глава 3. Методы ионно-пучковой обработки широкоапертурным ионным источником.....	71
3.1. Осесимметричная обработка	71
3.1.1. Особенности ионного травления вблизи оси вращения.....	74
3.1.2. Осесимметричная коррекция формы оптических элементов.....	86
3.2. Методика формирования полиномов Цернике	92
3.3. Формирование рентгенооптических элементов скользящего падения	97
3.3.1. Формирование тороидальных поверхностей ионно-пучковыми методами.....	97
3.3.2 Формирование цилиндрических оптических поверхностей	104
Глава 4. Методы ионно-пучкового формообразования малоразмерным фокусирующим ионным источником.....	111
4.1. Теоретическая модель травления.....	111
4.2. Приближенное решение	114
4.3. Эксперимент	119
4.4. Формирование оптических элементов произвольной формы малоразмерным сильноточным ионным пучком.....	122
4.5. Контурограф.....	125
Заключение	135
Список литературы	137

Введение

Актуальность темы исследования

Современное развитие прикладной оптики характеризуется активным освоением коротковолнового диапазона спектра: от вакуумного ультрафиолета (ВУФ) до жесткого рентгеновского излучения (ЖР). Этот тренд обусловлен задачами целого ряда высокотехнологичных областей: от проекционной литографии в экстремальном ультрафиолете (ЭУФ) [1] и рентгеновской астрономии [2] до нанодиагностики с использованием микроскопии в мягком рентгеновском диапазоне (МР) [3,4]. Короткая длина волны излучения накладывает жесткие требования на качество оптических поверхностей (форму и шероховатость). Для достижения дифракционного предела пространственного разрешения [5] в изображающих оптических системах, согласно критерию Марешаля [6], точность формы оптической поверхности (по параметру среднеквадратичного отклонения СКО) должна быть лучше $\lambda/14$, что в данном диапазоне соответствует субнанометровым величинам. Развитие источников жесткого рентгеновского излучения (синхротроны поколения 4 и 4+, лазеры на свободных электронах) привело к существенному повышению требований к качеству отражающих поверхностей коллимирующей и фокусирующей оптики скользящего падения. Угловая ошибка поверхности для таких систем не должна превышать $1 \cdot 10^{-6}$ рад, что также, обеспечивается лишь при субнанометровой точности формы [7]. Эти требования на 1–2 порядка превосходят стандарты для традиционной оптики видимого и ИК-диапазонов.

Дополнительным вызовом является низкий коэффициент отражения в коротковолновом диапазоне ($<70\%$), что требует минимизации количества оптических элементов в схемах и, как следствие, повсеместного применения высокоточной асферической (в том числе и неосесимметричной) оптики.

Основным методом формирования высокоточных асферических поверхностей для элементов оптики коротковолнового диапазона длин волн является ионно-пучковое травление (ion beam figuring IBF). Данная технология обеспечивает контролируемое удаление материала с поверхности под действием физического распыления, благодаря чему удаётся добиться высокоточной обработки и изготавливать поверхности сложной

формы. Ионно-пучковое травление является отработанной технологией, для которой создано специализированное оборудование [8, 9, 10] и разработан ряд методик [11,12,13]. Одним из ключевых применений IBF является финишная коррекция асферических оптических элементов малоразмерным пучком ионов, позволяющая достигать точности формы на уровне долей нанометра [10,14,15].

Однако постоянно растущие потребности новых научных установок класса «мегасайенс» и современных изображающих систем МР и ЭУФ диапазонов длин волн, в создании крупногабаритных оптических элементов с беспрецедентной точностью формы, а также зачастую со значительным отклонением от ближайшей сферы / плоскости, выявляют фундаментальные ограничения существующих методик IBF.

Степень разработанности темы исследования

Анализ современного состояния области показывает, что, несмотря на значительный прогресс со времен первых работ (80-х годов XX века), ионно-пучковая обработка сталкивается с рядом нерешенных проблем, которые можно систематизировать по следующим направлениям.

Математические и алгоритмические ограничения. Существующие подходы к расчету времени экспозиции (на основе методов Фурье-преобразования или линейной алгебры) имеют принципиальные недостатки. Решения, основанные на преобразовании Фурье, критически чувствительны к шумам исходных данных, а матричные методы отличаются высокой вычислительной сложностью и могут приводить к возникновению периодических структур на обрабатываемой поверхности.

Технологические и аппаратные проблемы. Ключевым ограничением является отсутствие универсальных ионных источников, совмещающих малый размер пучка с высокой плотностью ионного тока, что необходимо для эффективной обработки крупногабаритных поверхностей. Кроме того, недостаточно развиты методы комбинированной обработки, сочетающие асферизацию, предполагающую значительный объем удаляемого материала с финишной коррекцией локальных ошибок в рамках единого технологического цикла.

Метрологические сложности. Достижение субнанометровой точности обработки требует решения задач прецизионной координатной привязки с погрешностью лучше 100

мкм и учетом влияния крепления заготовки на результаты интерферометрических измерений формы поверхности.

Таким образом, достижение стабильных результатов, обеспечивающих точность лучше 1 нм на крупногабаритных оптических элементах, требует комплексного подхода, направленного на преодоление указанных ограничений. Настоящая работа нацелена на решение этих задач через разработку новых математических моделей и алгоритмов, оптимизацию технологических параметров и создание универсальной установки IBF с улучшенными характеристиками.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие методов ионно-пучковой обработки, обеспечивающих субнанометровую точность формы и атомарную гладкость поверхностей рентгенооптических элементов, а также создание универсальной установки для полировки, асферизации и коррекции локальных ошибок формы с использованием комбинации широкоапертурного и фокусирующих ионных источников.

Задачи диссертационной работы

Для достижения целей диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Разработка математических моделей и алгоритмов расчета времени экспозиции для коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком, осесимметричной обработки широкоапертурным пучком через профилирующие диафрагмы и формирования сложных асферических поверхностей (тороидальных, цилиндрических) ионно-пучковыми методами.
2. Развитие и экспериментальная апробация методов ионно-пучковой обработки, включающих комбинированную технологию грубой и финишной коррекции и многоступенчатую обработку пучками разного диаметра.
3. Разработка и модернизация установки ионно-пучковой обработки, включая создание фокусирующих ионно-оптических систем для источников КЛАН-53М и КЛАН-12М, разработку пяти координатной системы позиционирования образца и создание контурографа для точной юстировки заготовок.

4. Экспериментальная проверка разработанных методов на примере изготовления подложек зеркал для систем Киркпатрика-Баеза, тороидальных поверхностей, коллектора для ЭУФ-диапазона с асферической формой поверхности, и др.

Научная новизна работы

Разработана комплексная методика ионно-пучковой обработки, сочетающая три взаимодополняющих технологических режима (полировку широкоапертурным пучком, асферизацию через профилирующие диафрагмы и прецизионную коррекцию малоразмерным ионным пучком), что позволило достичь актуальных значений точности формы поверхности ($СКО < 1$ нм) при обеспечении ангстремной шероховатости.

Разработана и реализована установка ионно-пучкового травления, предназначенная для создания высокоточных оптических деталей диаметром до 320 мм и массой до 25 кг. Принципиальным отличием разработанной установки стала концепция подвижной детали, позволившая в минимальном объеме вакуумной камеры (диаметр 800 мм) интегрировать три независимых ионных источника (широкоапертурный с квазипараллельным ионным пучком и два фокусирующих) и реализовать полный цикл обработки – от асферизации и ионной полировки, до финишной коррекции - без нарушения вакуума.

Впервые предложен и экспериментально апробирован метод осесимметричной обработки со смещением центра вращения детали на склон распределения ионного тока в пучке, устраняющий принципиальные ограничения традиционных схем ионно-пучковой асферизации по неравномерности травления вблизи оси вращения обрабатываемой заготовки.

Впервые разработана методика коррекции волновых aberrаций, описываемых полиномами Цернике произвольного порядка, являющаяся развитием метода осесимметричной обработки с использованием профилированных диафрагм и периодического закона движения.

Предложен оригинальный алгоритм расчета времени экспозиции, основанный на матричном представлении задачи коррекции формы поверхности и оптимизации методом градиентного спуска, который обеспечивает отсутствие детерминированных ошибок с характерным масштабом размера ионного пучка.

Разработан и внедрен новый метод контроля положения заготовки с помощью оптического контурографа, обеспечивающий точность юстировки 2.5 мкм, что обеспечивает прецизионную привязку отражающей поверхности к координатной сетке установки IBF.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в создании комплексного технологического решения для производства высокоточной рентгеновской и ЭУФ-оптики, позволяющего преодолеть ключевые ограничения современных методов обработки (обеспечивает точность формы поверхности $СКО < 1$ нм и ангстремной шероховатости). Разработанные методы и оборудование применяются при изготовлении оптических элементов для перспективных научных установок класса мегасайенс, включая синхротронные источники нового поколения (СКИФ) и системы проекционной литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне. Реализованная установка ионно-пучковой обработки с уникальной комбинацией функциональных возможностей обеспечивает полный цикл финишной обработки (ионные полировка, асферизация и финишная коррекция локальных ошибок формы) подложек для многослойных рентгеновских зеркал, удовлетворяя мировому уровню качества оптических поверхностей.

Полученные результаты имеют существенное значение для отечественного приборостроения - разработанные технологии позволяют создавать оптические компоненты для рентгеновских микроскопов, телескопов, литографов, монохроматоров и коллимирующих систем, критически важных для современных исследований в области нанотехнологий, структурного анализа материалов и биомедицины. Особую ценность представляет возможность обработки крупногабаритных оптических элементов (до 320 мм) с субнанометровой точностью, что решает актуальную задачу импортозамещения в области высокоточных рентгенооптических элементов.

Разработанные в исследовании методы ионно-пучковой обработки нашли практическое применение при создании многих рентгенооптических компонентов для различных научных установок. В числе реализованных проектов: прецизионные подложки для объектива ЭУФ-микроскопа (ИФМ РАН), элементы системы визуализации плазменного факела фемтосекундного лазерного комплекса PEARL (ИПФ РАН), а также

высокоточный двухкристальный монохроматор и нанофокусирующая система для станции 1-1 "Микрофокус" строящегося синхротрона "СКИФ" (Новосибирск).

Методология и методы исследования

В основу работы положен системный подход, сочетающий теоретическое моделирование, экспериментальные исследования и практическую верификацию результатов. Методологическая схема исследования включает несколько взаимосвязанных этапов.

Теоретическая часть базируется на физико-математическом моделировании процессов ионно-пучкового травления. Разработаны оригинальные алгоритмы расчета времени экспозиции, основанные на матричных методах и численной оптимизации, учитывающие пространственное распределение плотности ионного тока. Для задач асферизации применены методы аналитического расчета профилирующих диафрагм с учетом геометрической оптики ионных пучков.

Экспериментальные исследования проводились с использованием модернизированной установки ионно-пучковой обработки, оснащенной тремя ионными источниками. Методика включала серии экспериментов проводимыми с различными материалами (монокристаллический кремний и сапфир) с варьированием параметров ионных пучков: сорт газа (Ar, Ne, Xe), энергия ионов (300-1500 эВ), ионный ток (0.3-200 мА) и времен экспозиции. Для каждого режима проводилась исследование характеристик ионного пучка, по данным которого строилось распределение скорости удаления материала за счёт физического распыления.

Поверхность исследуемых образцов характеризовалась в различных пространственных диапазонах. Прецизионные измерения формы поверхности проводились интерферометрическими методами (интерферометр Физо - Zygo VeriFire 4, Интерферометр с дифракционной волной сравнения - ИДВС, интерферометр белого света - SuperView W1). Анализ шероховатости микрорельефа поверхности проводился методами атомно-силовой микроскопии (АСМ Ntegra Prima, NT-MDT).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная установка ионно-пучковой обработки оптических элементов, оснащённая тремя источниками ускоренных ионов и пятиосной системой позиционирования детали, позволяют производить полировку, асферизацию и коррекцию

локальных ошибок формы поверхности (рентгено)оптических элементов размером до $\varnothing 320$ мм с произвольной формой и геометрией. Благодаря регулируемому диаметру пучка (2.1–160 мм), току (0.3–200 мА) и энергии (300–1500 эВ) ионов инертных газов обеспечивается точность формы до СКО = 0.6 нм и шероховатость в диапазоне пространственных частот $[4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1}]$ на уровне 0.15 нм.

2. Алгоритм вычисления карты травления для коррекции локальных ошибок формы поверхности (рентгено)оптических элементов с помощью малоразмерного ионного пучка диаметром d на основе метода градиентного спуска обеспечивает коррекцию ошибок форм поверхности с латеральными размерами $\geq d/2$.

3. Смещение оси вращения обрабатываемого через профилированную диафрагму (рентгено)оптического элемента относительно оси ионного пучка предотвращает появление ошибок формы вблизи оси вращения детали.

4. Комбинация профилированных диафрагм и переменной угловой скорости вращения детали позволяет изготавливать оптические поверхности с произвольной формой и проводить коррекцию локальных ошибок формы с помощью широкоапертурного сильноточного источника ионов.

Публикации по теме

По представленным на защиту материалам автором опубликовано 62 работы. Опубликовано: 19 статей в научных журналах [А1-А19] и 65 материалов в сборниках конференций и тезисов докладов [Т1-Т65], также имеется 3 патента [П1 – П3].

Личное участие автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, математическое моделирование процессов ионно-пучковой обработки, разработка алгоритмов расчета времени экспозиции ионного пучка, подготовка и исследование образцов, анализ и обобщение полученных результатов, написание и публикация статей, активное участие в конструировании и запуске установки для ионно-пучковой коррекции формы.

Степень достоверности и апробация результатов

Апробация содержащихся в данной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях: XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX Международные симпозиумы «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 года. Конференция "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике", г. Черноголовка, 13 – 17 сентября, 2021 год. Научные школы «Современная рентгеновская оптика», г. Нижний Новгород, 2022, 2024, 2025 год. XXVI Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП 2023)» Ярославль, 2023 г.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, изложена на 162 страницах, содержит 94 рисунка и 4 таблицы.

Содержание работы по главам

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, связанной с необходимостью создания высокоточных оптических элементов для рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов, для которых требования к форме и шероховатости поверхностей достигают субнанометрового уровня. Формулируется цель работы – разработка методов ионно-пучковой обработки, обеспечивающих дифракционное качество оптики. Определяются задачи исследования, включая разработку математических алгоритмов описания процесса ионно-пучковой коррекции формы, модернизацию установки и внедрение новых метрологических подходов. Подчеркивается практическая значимость работы для современных источников жесткого рентгеновского излучения, в частности синхротронов 4го поколения “СКИФ”, проекционной ЭУФ литографии, рентгеновской астрономии и микроскопии. Перечисляются основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна. Указывается личный вклад автора в математическое моделирование процессов ионно-пучковой обработки, разработку алгоритмов расчета времени экспозиции, создание установки ионно-пучковой обработки (рентгено) оптических элементов, модернизацию источников ионных пучков и проведение экспериментов. Приводится структура диссертации и количество публикаций по теме в рецензируемых журналах и сборниках.

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации, в котором отражены основные подходы для модификации формы и шероховатости поверхности твердых тел. Рассматриваются традиционные методы обработки (шлифование, алмазное точение) и их ограничения, а также современные бесконтактные технологии, включая ионно-пучковую коррекцию, магнитореологическую и струйную полировку. Особое внимание уделено эволюции метода IBF, начиная с первых работ 1980-х годов до современных установок, обеспечивающих точность обработки лучше 1 нм. Анализируются факторы, влияющие на качество обработки: стабильность ионного пучка, точность позиционирования, алгоритмы расчета времени экспозиции. Отдельно рассматриваются метрологические методы контроля формы и шероховатости, необходимые для достижения дифракционного качества оптики.

Во второй главе описывается изучение коэффициента распыления и наблюдение эволюции микрошероховатости перспективных материалов подложек для многослойных рентгеновских зеркал. А также рассматривается разработанная установка ионно-пучковой обработки, включающая три источника ускоренных ионов с различными характеристиками пучка и пятиосную систему позиционирования обрабатываемой детали, обеспечивающую точность движения на уровне десятков микрон, описана модернизация источников КЛАН-53М и КЛАН-12М, позволившая уменьшить диаметр пучков до 6.2 и 2.1 мм соответственно, и повысить точность коррекции локальных ошибок формы. Приводятся результаты исследования функции удаления материала (BRF) для каждого примененного в установке ионного источника, а также методики измерения распределения плотности ионного тока и профиля кратеров травления.

В третьей главе представлены методы ионно-пучковой обработки широкоапертурным источником через формирующую диафрагму, включая ионную полировку, осесимметричную коррекцию, асферизацию и формирование неосесимметричных поверхностей. Описан разработанный алгоритм расчета профилирующих диафрагм, устраняющий проблему неравномерного травления вблизи оси вращения. Приводятся результаты ионной полировки для образцов из плавленого кварца и монокристаллического кремния. Показано применение метода для изготовления тороидального зеркала с отклонением результирующей формы поверхности от заданной менее 0.5%. Описана методика создания цилиндрических поверхностей с использованием

щелевых диафрагм и переменной скорости движения заготовки. Приведены примеры успешного применения методик для формирования профиля подложек зеркал системы Киркпатрика-Баеза и других рентгенооптических элементов. Предложен технологический метод изготовления корректоров волнового фронта для компенсации оптических aberrаций с использованием широкоапертурного сильноточечного источника. Предложенный метод основывается на разложении aberrаций по базису полиномов Цернике. Математически обоснована возможность разделения переменных в уравнении травления на радиальную и азимутальную компоненты. Таким образом, метод реализуется за счёт комбинации стандартной осесимметричной обработки с добавлением стадии, создающей азимутальную зависимость профиля за счёт переменной скорости вращения заготовки.

В четвертой главе изложены методы коррекции локальных ошибок формы с использованием малоразмерного ионного пучка и создания элементов с произвольной формой поверхности. Разработан алгоритм расчета времени экспозиции, основанный на матричном представлении задачи и оптимизации методом градиентного спуска. Продемонстрирована возможность формирования асферических подложек с отклонением от ближайшей сферы (плоскости) до 36 мкм и достижение субнанометровой точности ($\text{СКО} < 1 \text{ нм}$) формы при обработке плоских и сферических поверхностей. Описан контурограф для точного позиционирования заготовок, позволивший устранить ошибки, связанные с неточной юстировкой. Приведены результаты применения методики при изготовлении подложек зеркал для монохроматора синхротрона СКИФ.

В заключении подведены итоги работы, сформулированы основные выводы и перспективные направления дальнейших исследований. Подчеркивается, что разработанные методы и оборудование позволяют создавать оптические элементы с точностью, соответствующей требованиям современных рентгеновских и ЭУФ-приложений. Намечены пути повышения производительности обработки и расширения функциональных возможностей установки.

Глава 1. Литературный обзор существующих методов формирования оптических элементов дифракционного качества

В настоящее время активно развиваются методы формирования прецизионных оптических элементов мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн, среди которых можно выделить высокоточные отражающие зеркала скользящего падения для синхротронного излучения (СИ) и изображающая оптика нормального падения для ЭУФ и МР диапазонов. В МР и ЭУФ диапазонах длин волн возможно формирование изображающей оптики нормального падения только на основе многослойных интерференционных зеркал, отражение от которых имеет характерный вид с узким пиком отражения (Брегговским максимумом). Интерес к оптике этого диапазона обусловлен в первую очередь возможностью существенного повышения разрешения оптических систем по сравнению с диапазонами видимого и ультрафиолетового излучения за счет уменьшения рабочей длины волны. Флагманом в развитии является проекционная ЭУФ литография [16], с помощью которой в мире уже производятся микропроцессоры с рекордными топологическими нормами. Значительный интерес также вызывает рентгеновская астрономия [17] изучающая процессы, протекающие на Солнце. Новым направлением в настоящее время является рентгеновская микроскопия [18], призванная помочь медикам и биологам изучать живые объекты с пространственным разрешением на уровне 10-20 нм и проводить z-томографию.

Согласно критерию Рэлея (1), пространственное разрешение (δx) определяется в первую очередь длиной волны излучения [5].

$$\delta x = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

где λ – рабочая длина волны света, NA – числовая апертура объектива. Из критерия Рэлея следует, что чем короче длина волны света, тем меньшие объекты могут быть разрешены. Однако он рассматривает идеальный случай, т.е. когда формирующие изображения линзы или зеркала идеальной формы. В случае, если это не так, из-за аберраций оптической

системы, дифракционный предел может быть достигнут, если будет выполнен критерий Марешаля:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(x_i, y_i) - \bar{S})^2} \leq \frac{\lambda}{14} \quad (1.2)$$

Где $S(x,y)$ – это форма поверхности оптического элемента, а $\bar{S}$ – это среднее значение поверхности. Критерий Марешаля [6] гласит, что оптическая система будет обеспечивать пространственное разрешение в соответствии с дифракционным пределом Рэлея, если качество поверхностей по параметру СКО будет лучше, чем $\lambda/14$. В этом случае разрешение происходит по уровню интенсивности 0.5, что считается достаточным. Соответственно переход в диапазон длин волн мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн излучения дает возможности, с одной стороны, существенно повысить пространственное разрешение оптических систем вследствие существенного сокращения длины волны (1.1). Но, с другой стороны, короткая длина волны (2 – 15 нм) накладывает высокие требования на качество оптических поверхностей (1.2). Если учесть, что длина волны составляет единицы нанометров, то точность формы оптической поверхности должна быть лучше 1 нм по параметру СКО, микрошероховатость поверхности должна быть лучше 0.3 нм, а для зеркал скользящего падения для сохранения когерентных свойств пучка важной является характеристика фазовой ошибки. Фазовая ошибка φ , вносимая в волновой фронт при отражении от неидеальной поверхности зеркала, описывается выражением 1.3 [19]:

$$\varphi = 2kd \sin \theta \quad (1.3)$$

где θ и k — угол скользящего падения и волновое число рентгеновского излучения соответственно, а d – высота профиля (peak to valley PV) ошибки формы зеркала. Для сохранения когерентных свойств пучка фазовая ошибка должна быть лучше $\pi/2$. Требуемый уровень ошибок формы поверхности должен быть обеспечен на всей рабочей поверхности оптических элементов, размер которых может составлять сотни миллиметров. При этом оптические поверхности могут иметь сложную асферическую форму, например, сегмент эллипсоида вращения, сегмент тора, параболические или эллиптические цилиндры и т.д.

Качество оптических поверхностей характеризуется распределением ошибок формы в широком диапазоне пространственных частот, каждому из которых соответствует специфическое влияние на рабочие характеристики оптики. Низкочастотные

составляющие (ошибки формы с латеральным размером > 1 мкм) приводят к возникновению волновых aberrаций, искажающих формируемое изображение. Среднечастотные компоненты (период 1 мкм – 1 мм) приводят к малоугловому рассеянию излучения, из-за чего снижается контраст оптической системы. Высоочастотные неоднородности (период < 1 мкм) ответственны за широкоугольное рассеяние, приводящее к значительным потерям интенсивности излучения.

Для комплексного контроля качества поверхностей применяется набор взаимодополняющих методик. Интерферометрия (например, интерферометры Физо) обеспечивает измерение формы поверхности в диапазоне низких и средних пространственных частот с нанометровой точностью. Микроинтерферометрия белого света (WLI) позволяет анализировать среднечастотные составляющие с разрешением по высоте до 0.1 нм. Рентгеновское рассеяние (XRDS) применяется для анализа высоочастотных неоднородностей. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет исследовать шероховатость поверхности с субнанометровым разрешением. Обеспечение высокой точности измерений на всех пространственных частотах является ключевым условием достижения требуемых характеристик оптических поверхностей.

Рассмотрим подробнее процесс изготовления высокоточных оптических поверхностей для многослойных рентгеновских зеркал.

1.1. Механическая обработка/полировка подложек рентгеновских зеркал

Процесс формирования зеркала на заготовке из исходного материала обычно выполняется в несколько этапов, как показано на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Схема процесса формирования высокоточной рентгенооптической поверхности от шлифовки исходной заготовки до нанесения многослойного рентгеновского зеркала

На начальном этапе формирования зеркала обычно используются механические методы, такие как шлифовка, точение и притир, позволяющие изготовить плоские/сферические заготовки с точностью примерно 10 нм по параметру СКО [20]. Для быстрого и точного удаления материала обычно используется система с числовым программным управлением (ЧПУ). Для изготовления прецизионных асферических зеркал применяется токарная обработка алмазным резцом. Данный метод сочетает высокую скорость удаления материала с обрабатываемой поверхностью с хорошей точностью (погрешность до 100 нм или лучше) даже для сложных геометрических форм [21,22].

Однако точность механической обработки поверхностей ограничена, так как на поверхностях, обработанных механическими методами, остаются характерные следы полировки или токарной обработки, которые возникают из-за ограниченного размера инструмента, неравномерного износа инструмента, вибраций в системе, ошибок в движении или допуске инструмента, а также из-за свойств материала или примесей. Кроме того, в ходе обработки формируется приповерхностный разрушенный слой. В работе [23,24] (Рисунок 1.2) был продемонстрирован пример следов механической обработки на зеркале, изготовленном с помощью алмазного резца, которые возникают как в миллиметровом масштабе (ошибки формы поверхности), так и в микронном масштабе (шероховатость). Хотя глубина этих следов может составлять всего несколько

нанометров, этого достаточно, чтобы ухудшить характеристики зеркал, например, для жёсткого рентгеновского излучения [25].

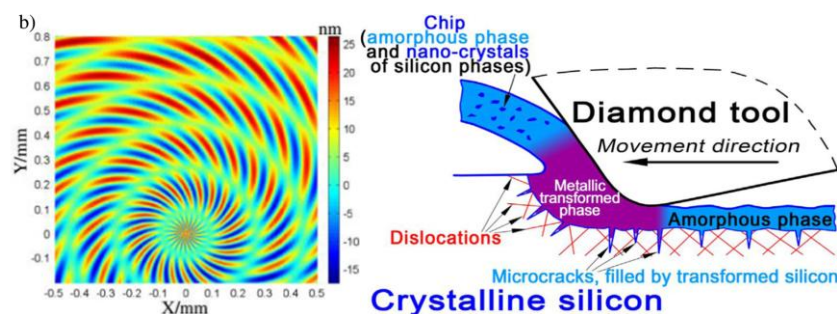


Рисунок 1.2 Характерные следы реза, формируемые на оптической поверхности в ходе точения, и схема формирования разрушенного слоя. Работа [24]

После формирования оптической поверхности механическими методами шероховатость подложки может не удовлетворять требованиям рентгеновского диапазона [26]. Для улучшения шероховатости применяется химико-механическая полировка (ХМП).

Согласно данной технологии, химическая обработка поверхности происходит за счёт того, что действующее вещество, содержащееся в составе суспензии (например, аммиак) вступает в реакцию с материалом заготовки, а мелкие зёрна более мягкого материала, в свою очередь, позволяют удалять продукты реакции не повреждая поверхность. Полировальник при этом изготавливается из ткани, что позволяет снизить механическое воздействие на обрабатываемую заготовку.

Благодаря применению ХМП шероховатость зеркал может быть снижена до уровней ниже 0.3 нм [27]. Однако при химико-механической полировке (ХМП) неравномерная скорость удаления материала на различных участках поверхности может приводить к увеличению ошибок формы. Таким образом, отполированное зеркало будет иметь превосходную шероховатость, но точность формы не будет отвечать требованиям.

1.2. Методы локальной обработки

Применение методов локальной обработки обычно являются заключительным этапом в производстве оптики. Этот этап используется для исправления ошибок в масштабе 1 – 100 мм, которые остаются на полированной подложке, обработанной с помощью механических методов. Данные методы обеспечивают высокоточную выборочную локальную обработку без негативного влияния на шероховатость подложки. Для

проведения локальной обработки предварительно измеряется карта ошибок формы поверхности, в соответствии с которой производится обработка. Карта поверхности измеряется интерферометрическими методами. Скорость удаления или нанесения материала при высокоточной выборочной обработке обычно низка, порядка 10 нм/с, что обеспечивает повышенную точность при исправлении очень мелких ошибок. Чаще всего в ходе высокоточной обработки материал удаляется с поверхности, однако некоторые методы напротив предполагают контролируемое нанесение материала на поверхность.

Для проведения локальной обработки требуются три компоненты. Во-первых, необходимо точно измерить существующую ошибку формы подложки зеркала. Точность измерений должна быть выше желаемой точности формы поверхности детали. Во-вторых, необходимо знать какую форму поверхности требуется получить по завершении процесса. Наконец, должен быть какой-то способ выборочно и контролируемо удалять или добавлять материал в разных местах подложки. Например, изменяя скорость движения инструмента или параметры процесса обработки, контролируемо увеличивать или уменьшать скорость удаления/нанесения.

В настоящее время для высокоточной финишной обработки поверхностей подложек многослойных рентгеновских зеркал применяются различные технологии. Методы различаются в зависимости от того, добавляется или удаляется материал, по способу удаления/нанесения материала. К известным методам относятся ионно-плазменная обработка [28-31], в ходе которой используется пучок нейтрализованных ионов для избирательного распыления материала с поверхности; магнитореологическая обработка [32-34], при которой используется специальная магнитная суспензия, позволяющая контролировать давление жидкости с помощью внешнего магнитного поля; струйная полировка методом упруго-эмиссионной обработки [35-37], при которой используется узкий поток полировочной суспензии под высоким давлением для точного удаления материала и дополнительного сглаживания всей поверхности; магнетронное напыление [38-40], при котором материал наносится на поверхность. Рассмотрим подробнее каждый из представленных методов

1.2.1. Магнитореологическая обработка

Магнитореологическая обработка (MRF) [41] – это метод полировки, в ходе которого обрабатываемая заготовка удерживается вблизи вращающегося элемента (такого как

колесо или лента), на поверхности которого под действием магнитного поля формируется «жгут» из ферромагнитной жидкости с абразивными частицами (рисунок 1.3) [42]. В ходе обработки суспензия, содержащая абразивные частицы (оксид церия и т.п.) вращается на колесе и касается поверхности заготовки, что приводит к удалению материала.

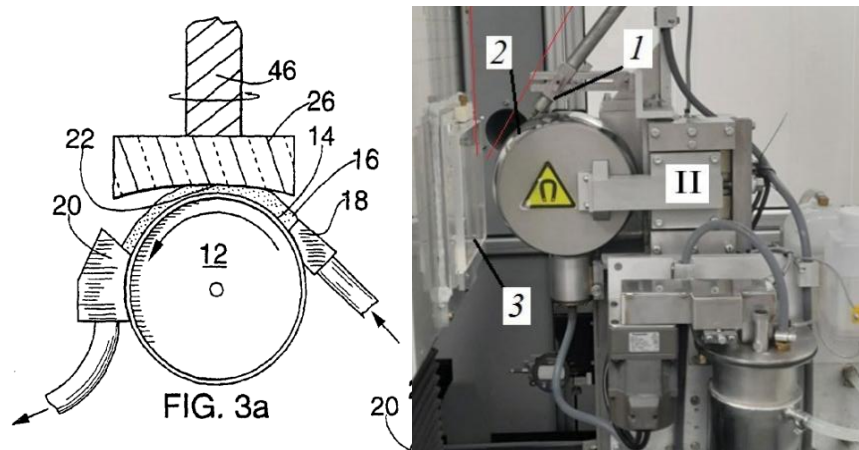


Рисунок 1.3. Схема проведения магнитореологической полировки и фото установки. Цифрами обозначены основные элементы: 12 (2) – Вращающееся колесо, 16 – «жгут» из ферромагнитной жидкости, 18 (1) – сопло подачи жидкости, 20 – отвод жидкости, 22 – пятно контакта, в котором происходит обработка, 26 (3) - обрабатываемая заготовка, 46 – крепление заготовки.

Давление жидкости на заготовку может изменяться в режиме реального времени путем регулировки напряженности магнитного поля, которое увеличивает или уменьшает вязкость суспензии из-за присутствия магнитных частиц. Таким образом, скорость удаления материала может регулироваться в разных точках поверхности подложки, обеспечивая требуемое распределение удаляемого с поверхности материала. Для проведения контролируемой обработки необходимо предварительно рассчитать время нахождения «жгута» суспензии в различных точках поверхности. Для контроля процесса обработки необходимо учитывать влияние параметров жидкости – состава, консистенции, температуры, давления и так далее. Всё должно быть тщательно откалибровано, чтобы обеспечить точную коррекцию ошибок формы поверхности.

1.2.2. Струйная полировка

Гидроабразивная полировка (FJP) [37] – это метод, в котором используется струя жидкости или полировальной суспензии под высоким давлением, которая перемещается по зеркалу для удаления материала (рисунок 1.4) [43]. В дополнение к

детерминированному удалению в центре струи слой жидкости распространяется по поверхности на более широкую область, что может способствовать дополнительному сглаживанию микронеровностей поверхности. Таким образом, этот метод может улучшить шероховатость поверхности наряду с исправлением погрешности формы.

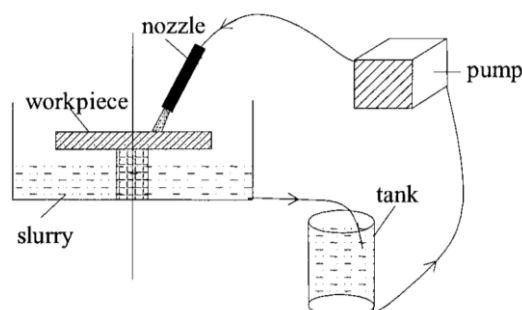


Рисунок 1.4. Схема проведения гидроабразивной полировки. Жидкость полировальной суспензии под давлением подаётся в направлении обрабатываемой поверхности.

FJP позволяет с высокой точностью корректировать погрешности формы. Размер струи суспензии обычно составляет порядка 0.2–1 мм в диаметре, что позволяет корректировать погрешности формы, сопоставимые с этим размером. Данный метод можно применять к различным поверхностям, а параметры струи жидкости, включая давление, размер сопла и состав суспензии, можно выбирать в зависимости от требований к зеркалу. Однако, как и в случае с MRF, необходимо точно калибровать и контролировать влияние таких факторов, как температура, давление и состав суспензии (включая виды и размер частиц), чтобы обеспечить точное удаление и минимизировать влияние на шероховатость поверхности [43]. Кроме того, из-за низкой скорости удаления, 1 – 10 нм/с [44], общее время обработки FJP может быть достаточно длительным (десятки часов), в течение которого необходимо обеспечивать стабильность параметров.

1.2.3. Магнетронное осаждение

Магнетронное осаждение [39] (рисунок 1.5) – это аддитивный метод обработки, в ходе которого профиль поверхности формируется путём нанесения тонкого слоя материала. Толщина слоя контролируется траекторией движения обрабатываемой подложки относительно магнетрона и профилем фигурной диафрагмы. [40]. Материал наносится в виде одного или нескольких корректирующих слоев перед нанесением многослойного отражающего покрытия.

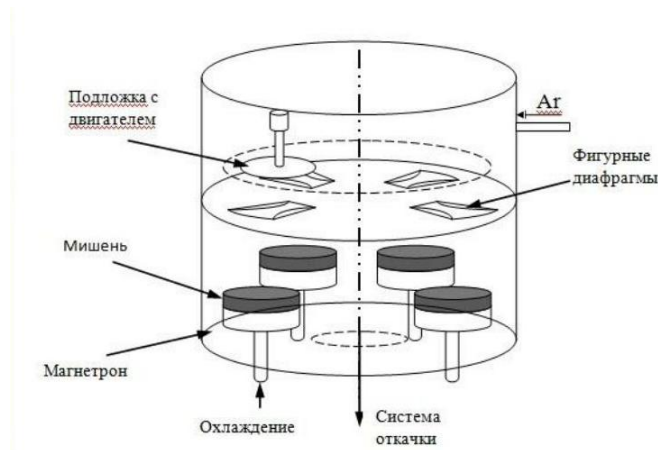


Рисунок 1.5 Схема процесса магнетронного осаждения

Данная технология хорошо подходит для изготовления многослойных рентгеновских зеркал, так как и само многослойное покрытие изготавливается магнетронным напылением. Однако существует ограничение на PV формируемой асферики, и шероховатость поверхности может ухудшаться в процессе осаждения слоёв.

1.2.4. Ионно- пучковая обработка

Наиболее распространенным методом формирования высокоточных оптических поверхностей является ионно-пучковая обработка [28] – это детерминированный метод обработки, при котором используется пучок ускоренных ионов для распыления материала с обрабатываемой поверхности. Размер пучка обычно варьируется в диапазоне 0.1 – 100 миллиметров, что позволяет корректировать ошибки формы поверхности различных латеральных масштабов. В ходе ионно-пучковой обработки скорость удаления материала составляет порядка нескольких нанометров в секунду, что позволяет контролируемо обрабатывать неровности высотой менее нанометра. Ионно-пучковая обработка широко применяется при изготовлении высокоточных подложек из аморфных материалов, например, SiO_2 , Zerodur, ULE [45]. Ионно-пучковая обработка кристаллических материалов зачастую приводит к ухудшению шероховатости [46], но существуют режимы, в которых шероховатость не развивается, например, как было показано в работе [47].

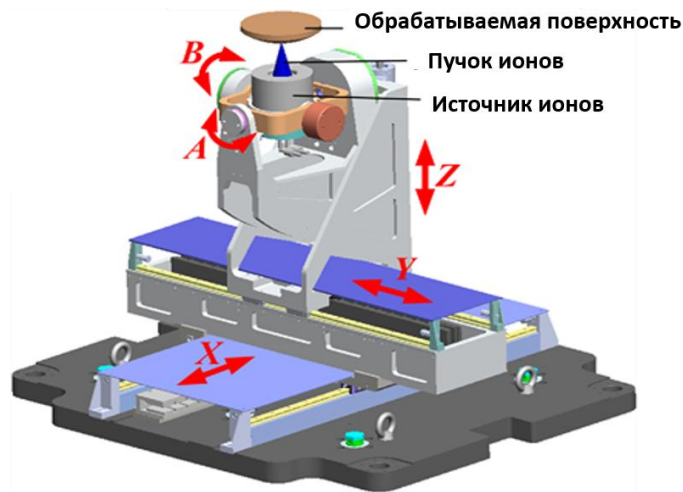


Рисунок 1.6. Схема устройства установки ионно-пучковой обработки [48].

На рисунке 1.6. схематически представлена установка ионно-пучковой обработки. Существуют различные варианты реализации системы ионного травления, различающиеся физическими принципами удаления материала. Из которых можно выделить несколько категорий травления, а именно: ионно-пучковое, реактивно-пучковое, плазмохимическое и плазмоструйное.

Ионно-пучковое травление основывается на эффекте физического распыления поверхности [49]. Согласно модели Зигмунда, ускоренный падающий ион выбивает атомы из положения равновесия в мишени и приводит их в движение; эти атомы движутся в веществе, сталкиваются с другими атомами и при определённых обстоятельствах выбивают атомы с поверхности мишени. Процесс распыления характеризуется коэффициентом распыления (1.4), где Y – количество распылённых атомов, приходящихся на один ион; e - заряд электрона; N_a – число Авогадро; M_2 – молярная масса мишени; j - плотность ионного тока; ρ - плотность мишени; v_{etch} - скорость травления (отношение глубины ионного травления к времени травления).

$$Y = \frac{e\rho N_a v_{etch}}{M_2 j} \quad (1.4)$$

Физическое распыление позволяет проводить контролируемое удаление материала на глубину от долей нм до десятков мкм [50]. В зависимости от энергии падающих ионов может реализовываться один из нескольких вариантов. При энергии падающих ионов менее 100 эВ распыление происходит в режиме первичного прямого выбивания атомов. Следующий режим – линейные каскады, так называемый “атомный бильярд”. Линейные

каскады реализуются при энергиях от 100 до 1500 эВ. При энергии падающих ионов в диапазоне от 1.5 кэВ до 10 кэВ пространственная скорость перемещения плотности вещества достаточно велика внутри мишени, и такой режим принято называть «spike». При энергии $E_{\text{ion}} > 10$ кэВ ионы практически не взаимодействуют с поверхностью и создают распределение легирующей примеси внутри образца. Для ионной очистки поверхности материалов (удаления адсорбированных частиц) обычно используют ионы с энергией в диапазоне от 20 до 200 эВ, а для ионного травления (удаления слоев основного материала) - от 200 до 10000 эВ. Для реализации физического распыления используются инертные газы, в таком случае на поверхности не происходит химических реакций.

Плазмохимическое травление отличается от других типов тем, что в процессе травления не подаётся ускоряющее напряжение, и используется химически активный рабочий газ. Разряд горит в приповерхностном слое, где и происходят химические реакции [51]. Благодаря такому методу можно производить равномерное травление всего образца, что применяется, например, в литографии.

В случае реактивно-пучкового травления, кроме физического распыления, происходят химические реакции, в результате которых формируются летучие соединения атомов активного газа и атомов мишени, благодаря чему скорость обработки значительно увеличивается [52]. Такой подход объединяет плазмохимическое и ионно-пучковое травление. В качестве активного газа используют фторсодержащие соединения, например, фреоны (CF_4 , CF_3H), элегаз (SF_6) и др., имеющие летучие соединения с атомами Si (основной составляющий элемент всех оптических стекол и керамик). При использовании химически активных газов появляются дополнительные требования к установке ионно-пучкового травления, так как химическим реакциям будет подвержен и сам источник ионов, и элементы установки, попадающие в ионный пучок. Из-за этого, например, быстрому выходу из строя подвержены все изоляторы внутри источника, катод и разрядная камера.

Следующим типом обработки является плазмоструйное травление (plasma jet). Отличительная особенность данного метода в том, что обработка происходит при атмосферном давлении, на открытом воздухе [53]. Химически активный газ реагирует с воздухом и атомами поверхности. Из-за высокой температуры пламени плазменной струи поверхность локально плавится. Плазмоструйный метод является самым быстрым из всех

методов обработки, но протекающие процессы трудно контролировать, поэтому точность такой обработки не высока.

Все обозначенные выше методы применяются для обработки оптических поверхностей, но наиболее востребованным в силу чистоты, простоты реализации, воспроизводимости процесса и качества получаемых поверхностей, как с точки зрения формы, так и шероховатости оказался метод ионно-пучкового травления.

1.3. История и принципы IBF

1.3.1. Развитие IBF: с 1980-х годов по настоящее время

Использование ионных пучков для коррекции оптических искажений было впервые продемонстрировано в конце 1980-х годов. Ранние работы, такие как [29] показали, что данный метод может исправлять ошибки формы поверхности с точностью несколько десятков нанометров по параметру СКО, сохраняя при этом низкую шероховатость поверхности для различных оптических материалов, таких как плавленый кварц и некоторые типы стёкол. Также было продемонстрировано, что метод ионно-пучковой коррекции формы может быть использован при обработке ряда других материалов, включая кремний, германий, сапфир и поликристаллический карбид кремния, без ущерба для шероховатости поверхности [54]. Однако для некоторых поликристаллических металлов, включая тонкие плёнки алюминия и меди, наблюдалось значительное ухудшение шероховатости.

Несмотря на потенциальную эффективность нового метода, внедрение этой технологии шло достаточно медленно. Отчасти это было связано с ограничениями вычислительной мощности того времени [55] и возможностями механической обработки, когда многолинзовые объективы со сферическими оптическими поверхностями позволяли корректировать аберрации в изображениях. Однако были отмечены преимущества этой новой методики, такие как отсутствие эффектов, связанных с износом инструмента, возможность применения для больших оптических систем (метрового масштаба), возможность локального удаления материала с поверхности, низкая скорость обработки и как следствие возможность контроля процесса.

Ионно-пучковая коррекция локальных ошибок формы поверхности оптических элементов начала вызывать большой интерес в начале 2000-х годов, когда стали

очевидными потребности в переходе литографического оборудования в ЭУФ диапазон длин волн [56]. Методы IBF, успешно зарекомендовавшие себя при изготовлении оптики в более ранних литографических системах, оказались необходимыми и для достижения технических характеристик новых поколений оборудования [57]. Кроме того, для источников синхротронного излучения третьего поколения, таких как BESSY-II и SPring-8, потребовались высокоточные асферические зеркала, работающие в скользящих углах падения [58-60]. Для решения данных задач были разработаны коммерческие установки IBF, способные создавать оптику габаритом до 700 мм и уменьшать среднеквадратичные ошибки формы до нанометрового или даже субнанометрового уровня [61]. В то время разработка была в значительной степени обусловлена спросом на высококачественные зеркала (и линзы) для полупроводниковой литографии, однако, также обсуждалось использование данной технологии для разработки других типов оптики, в том числе рентгеновских зеркал. В 2010-х и начале 2020-х годов известность и возможности IBF продолжали развиваться. В работе [62] приводятся результаты по изготовлению рентгеновских объективов для задач астрономии, микроскопии и литографии.

За последнее десятилетие многие лаборатории начали внедрять собственные установки [61]. Ключевым преимуществом таких установок является то, что они могут использовать передовые метрологические средства, имеющиеся во многих лабораториях, которые зачастую не уступают, а то и превосходят средства коммерческих производителей оптики, что позволяет быстро и эффективно устранять погрешности на подложках рентгеновских зеркал за несколько итераций ионно-пучковой обработки [63].

С момента появления метода ионно-пучковой коррекции формы достижения в области метрологии и развитие технологии позволили каждые пять лет уменьшать среднеквадратичную ошибку формируемых поверхностей примерно вдвое. В последние годы данная технология позволяет надёжно получать оптические поверхности с ошибками формы менее 1 нм по параметру СКО.

1.3.2. Принципы проведения ионно-пучковой обработки

Для реализации ионно-пучковой обработки необходимы два основных компонента: Источник ионов и система позиционирования, способная выполнять сканирование пучка ионов по всей поверхности обрабатываемой детали. Другие составляющие технологической установки, такие как вакуумная камера, система откачки, система

охлаждения и др., позволяют поддерживать необходимые для обработки условия. Поэтому в данном обзоре будем рассматривать принцип работы установок ионно-пучковой обработки оптических поверхностей и их систем позиционирования.

Под воздействием ионного пучка материал образца распыляется, при этом глубина удаления материала в общем случае линейно пропорциональна времени воздействия. Контролируя время нахождения ионного пучка на поверхности можно точно и прогнозируемо удалять материал. IBF обычно проводится в вакууме, чтобы максимально увеличить среднюю длину свободного пробега ионов и свести к минимуму присутствие загрязняющих веществ и реагентов. Поэтому компоненты системы IBF размещаются в вакуумной камере, оснащенной вакуумными насосами, которые позволяют достичь желаемого давления $\leq 1 \cdot 10^{-6}$ Торр (при типичном рабочем давлении $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Торр). Ниже подробно описаны отдельные компоненты системы IBF.

Источник ионов

Параметры источника ионов определяют возможности системы IBF по скорости и профилю удаления материала. Временная стабильность и линейность ионного травления имеют решающее значение для проведения точного процесса, поэтому источник ионов также должен быть очень стабильным.

Обычно используется источник ионов с сетками типа Кауфмана [50]. Сетки изготавливают из материалов с высокой температурной стабильностью и низким коэффициентом распыления под воздействием ионного потока, пиролитический графит, молибден и т.п. Для физического распыления используются благородные газы, в основном, в качестве рабочего газа используется аргон, однако и другие (Ne, Kr, Xe) также применяются. Выбор рабочего газа обусловлен обрабатываемым материалом, так как коэффициент распыления и поведение шероховатости зависит от пары рабочий газ – материал мишени. При использовании инертных газов процесс распыления является чисто физическим, что помогает обеспечить линейность процесса удаления.

В плазмохимическом варианте IBF для распыления используются активные газы, такие как кислород, CF_4 , SF_6 вызывающие образование летучих химических соединений в процессе обработки [64-67]. Преимущество плазмохимического травления заключается в более высокой скорости удаления материала с поверхности, и может быть более

применимо к определенным материалам, таким как алюминиевые сплавы. Однако химические реакции, происходящие на поверхности, включают гораздо более сложный процесс удаления по сравнению с IBF с использованием инертных газов. Следовательно, необходимым условием для проведения плазмохимической обработки является точная калибровка и стабильность скорости удаления.

Бомбардировка поверхности подложки зеркала высокоэнергетическими ионами может привести к её повреждению и образованию микродефектов, что будет приводить к росту шероховатости и снижать оптическое качество зеркала. Поэтому важно подобрать энергию ионов таким образом, чтобы обеспечить контролируемое удаление материала при минимальном повреждении поверхности.

Оптимальная энергия ионов зависит от типа и массы ионов, а также от материала обрабатываемой заготовки. Например, для ионов аргона (Ar) типичный диапазон энергий при ионно-пучковой обработки составляет 400–1500 эВ. При таких параметрах скорость травления кремниевых подложек достигает ~ 1 нм/с.

Ионный пучок может быть сфокусированным или коллимированным в зависимости от конфигурации ионно-оптической системы (ИОС), причём каждый вариант имеет свои преимущества: сфокусированный пучок обеспечивает высокую плотность ионного тока и повышенную скорость травления на малой площади, тогда как коллимированный пучок с широким профилем лучше подходит для грубой коррекции поверхности. Для обработки изогнутых оптических поверхностей критически важен контроль угла падения ионов, так как коэффициент распыления зависит от этого параметра; для устранения данной проблемы приходится применять пяти- или шестиосевые системы позиционирования, обеспечивающие ориентацию ионного пучка по локальной нормали к поверхности [68,69]. Альтернативный подход – расчёт обработки с учётом пространственного распределения функции удаления материала, в данном случае применяется трехосная схема позиционирования [70,71]. Однако в случае трехосной схемы заметно усложняется математическая обработка при расчете карты сканирования из-за проекции пучка на криволинейную поверхность и существенной зависимости скорости травления от локального угла падения. Кроме того, наклонное падение может привести к развитию шероховатости поверхности [72-73]. Соответственно, оптимальной системой

позиционирования является пятиосная, поскольку позволяет справиться с вышеописанными проблемами.

Конфигурация движения

Во время ионно-пучковой обработки реализуется сканирование ионным пучком по поверхности заготовки. Для этого либо обрабатываемый оптический элемент, либо источник ионов перемещается, в то время как другой компонент остается неподвижным. Другой подход заключается в том, чтобы зафиксировать и источник ионов, и оптическую поверхность, а для управления удалением материала использовать подвижную диафрагму [74-76], но этот метод не получил широкого распространения.

Выбор подвижного элемента осуществляется исходя из размеров обрабатываемой области. Общий размер требуемого движения и камеры для обработки может быть описан $L = 2 \cdot X + Y$, где X и Y это размеры обрабатываемой заготовки и источника ионов. Рациональным представляется двигать то – что имеет меньший размер.

Перемещение ионного источника позволяет уменьшить габариты установки IBF в случае обработки оптических элементов, размер которых много больше размера источника: при фиксированном положении заготовки длина вакуумной камеры должна соответствовать размеру самого крупного обрабатываемого оптического элемента плюс удвоенный размер источника ионов. В случае обработки небольших оптических элементов для уменьшения размеров вакуумной камеры следует перемещать заготовку относительно стационарного источника. В данном случае для дополнительного уменьшения габаритов установки ионного травления можно применять для перемещения не декартову, а цилиндрическую кинематическую схему. В таком случае сканирование осуществляется изменением азимутального угла и радиуса. Объём камеры критически важен как для времени откачки до рабочего вакуума, так и для компактности всей установки.

Выбор количества степеней свободы зависит от задачи: 1D-сканирование с одной осью движения подходит для осесимметричной асферизации [30], формирования цилиндрических подложек для зеркал скользящего падения, включая элементы системы Киркпатрика-Баеза [77]. 2D-сканирование требует минимум двух осей, а типичные конфигурации включают 3-6 степеней свободы (с регулировкой расстояния источник-

образец и угла падения пучка ионов на поверхность), что значительно расширяет возможности коррекции при возрастании сложности геометрии.

Исходя из конфигурации ионного пучка (сфокусированный или коллимированный) в технологии ионно-пучковой обработки выделяют два основных метода: коррекцию локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком и одномерную обработку широкоапертурным ионным источником через формирующую диафрагму. Коррекция локальных ошибок формы обеспечивает прецизионное удаление материала с точностью до субнанометрового уровня, однако, имеет ограниченную производительность, что для крупногабаритных заготовок делает процесс довольно длительным. В отличие от этого, одномерная обработка высокоточным широкоапертурным позволяет эффективно формировать глубокий асферический рельеф на больших оптических элементах. Выбор метода определяется конкретными задачами: первый подход оптимален для финальной доводки сложных поверхностей и коррекции средне- и высокочастотных ошибок, второй – для быстрой асферизации и черновой обработки. Современные тенденции предусматривают комбинирование обоих методов в гибридных технологических процессах, где одномерная обработка задаёт базовый профиль, а локальная коррекция обеспечивает финишную точность.

1.4. Проблемы, связанные с коррекцией локальных ошибок формы

Хотя метод ионно-пучковой коррекции концептуально прост, достижение субнанометровой точности обработки поверхности, необходимой для современных рентгеновских зеркал, как было сказано выше, требует решения трёх ключевых задач:

- (1) Получение высокоточных метрологических данных с погрешностью, значительно меньшей требуемой точности обработки, включая оптимизацию алгоритмов их обработки для минимизации систематических ошибок;
- (2) Разработка адаптивных алгоритмов расчёта времени коррекции, учитывающих специфику различных типов поверхностей и эффекты взаимодействия ионного пучка с материалом;
- (3) Обеспечение точного контроля всех параметров процесса, включая прецизионное позиционирование пучка (с использованием специализированных маркеров на обрабатываемой поверхности и систем обратной связи), точное определение функции

удаления материала и минимизацию систематических погрешностей на каждом этапе. Критически важным является согласование допусков между всеми подсистемами установки, поскольку конечная точность обработки определяется наименее точным элементом технологической цепочки.

1.4.1. Проблемы позиционирования

Процесс IBF требует точного согласования двух систем координат: системы позиционирования ионного пучка и метрологической системы, описывающей профиль поверхности оптического элемента. Для коррекции ошибок в миллиметровом масштабе необходимо обеспечить точность позиционирования лучше 100 мкм, так как бóльшие отклонения существенно снижают качество обработки [7]. Стандартный подход использует специализированные маркеры на обрабатываемой поверхности (обычно крестообразные метки или искусственно созданные ионным пучком кратеры), которые служат реперными точками для взаимной привязки координатных систем. В установках со встроенной камерой положение образца определяется по оптическим меткам, тогда как интерферометрические системы могут использовать как оптические маркеры, так и специально созданные на оптической поверхности структуры. Для инструментов, измеряющих наклон или кривизну, требуются объёмные реперные элементы (например, выгравированные бороздки), чьё положение должно точно совпадать с координатами ионного пучка перед началом процесса обработки. Комбинирование различных типов маркеров (крестов и кратеров) позволяет согласовывать данные между разными метрологическими системами, обеспечивая точную пространственную привязку на всех этапах коррекции поверхности.

Точное определение функции удаления материала

Для обеспечения высокой точности ионно-пучковой обработки требуется точное определение функции удаления материала BRF, характеризующей распределение скорости травления по сечению пучка. Стандартная методика предполагает создание тестового кратера на поверхности образца с последующей аппроксимацией его профиля двумерной аналитической функцией $BRF(x,y)$, где амплитуда функции нормируется на время экспозиции, что позволяет количественно оценить скорость удаления материала. Форма BRF существенно зависит от конфигурации пучка: при использовании фокусирующих источников в зависимости от расстояния от источника до образца кратер

может значительно изменяться. При нахождении образца вблизи фокуса наблюдается гауссово распределение, тогда как вблизи источника пучок ионов может представлять набор отдельных кратеров от каждой ячейки ускоряющей сетки. В случае применения обрезавшей ионный пучок диафрагмы функция удаления материала определяется диафрагмой, и краевыми эффектами. На BRF также влияют: расстояние до образца, угол падения пучка ускоренных ионов на поверхность (что особенно критично для подложек со значительной кривизной поверхности), материал подложки, её структура и состояние поверхности (толщина оксидных слоёв, история обработки). Наиболее точные результаты даёт определение BRF непосредственно на обрабатываемой подложке, однако на начальных этапах грубой коррекции допустимо использование "жертвенных" тестовых образцов с аналогичными характеристиками.

Оптимизация геометрических параметров ионного пучка

Применение фигурных апертурных диафрагм и фокусирующих ионно-оптических систем позволяет точно регулировать размер и форму ионного пучка в диапазоне от 0.1 до сотен мм [78]. Критерии выбора оптимальных параметров пучка определяются спектральным составом корректируемых поверхностных дефектов: как было показано в работе [79], пучки диаметром 10 мм и 5 мм эффективно устраняют низкочастотные составляющие (период ~ 100 мм) ошибки формы поверхности, но не корректируют среднечастотные компоненты (период ~ 3 мм), тогда как 1 мм пучок обеспечивает исправление всего спектра дефектов, но требует существенно большего времени обработки. Экспериментально установлено, что гауссов пучок диаметром d эффективно устраняет дефекты с пространственным периодом $\geq d$ [80]. При этом чрезмерно малый размер пучка приводит к значительному росту времени обработки (до сотен часов) и возникновению погрешностей, обусловленных увеличением вклада в результат неустойчивости системы, тогда как слишком большой диаметр пучка ухудшает сходимость алгоритма коррекции. Оптимальная стратегия предполагает многоступенчатую обработку: последовательное применение пучков с уменьшающимся диаметром от грубой (низкочастотной) к точной (высокочастотной) коррекции, что обеспечивает баланс между точностью и производительностью, несмотря на необходимость промежуточных метрологических измерений после каждой итерации.

1.4.2. Метрология

Требования к точности и повторяемости метрологических измерений

Достижение субнанометровых погрешностей по высоте и угловых отклонений менее 1 мкрад в процессе IBF требует соответствующей метрологической системы, способной надежно измерять такие малые величины. Для успешной коррекции формы поверхности критически важны точные измерения профиля до и после обработки, причем повторяемость измерений должна соответствовать или превосходить требуемую точность обработки.

Помимо коррекции ошибок формы в миллиметровом диапазоне, критически важно контролировать шероховатость в микронном, субмикронном и нанометровом диапазонах, поскольку повышенная шероховатость ($\sigma > 0.5$ нм) приводит к рассеянию и потере интенсивности отраженного пучка. Для измерения шероховатости применяются: микроинтерферометрия, контактные профилометры, атомно-силовая микроскопия (АСМ) и рассеяние рентгеновского излучения (XRDS). При этом методы вроде микроинтерферометрии и АСМ анализируют лишь локальные участки, поэтому необходимо проводить множественные измерения в репрезентативных точках поверхности, чтобы получить достоверную оценку состояния всей рабочей области оптической поверхности и гарантировать, что процесс обработки не ухудшает микроструктуру поверхности.

Влияние крепления и позиционирования образца на точность измерений

Точность метрологических измерений существенно зависит от способа фиксации оптического элемента, поскольку механические напряжения при неправильном креплении и прогиб образца под действием силы тяжести могут вызывать деформации поверхности до сотен нанометров [81]. Как было показано в работе [82], разница между профилями закрепленного и свободного оптического элемента может превышать 100 нм. Для минимизации искажений рекомендуется: (1) использовать минимально необходимое усилие зажима; (2) по возможности проводить измерения в свободном состоянии; (3) применять специализированные крепления с регулируемым усилием и компенсацией гравитационного прогиба. Особую сложность представляет итерационный процесс IBF,

требующий точного повторного позиционирования образца при каждой загрузке образца в установку.

Процесс IBF сталкивается с принципиальным противоречием в требованиях к креплению оптического элемента: с одной стороны, необходимо обеспечить точное и воспроизводимое позиционирование с помощью специализированных держателей с механическими упорами, с другой - минимизировать механические напряжения, искажающие результаты измерений. Дополнительную сложность создают тепловые эффекты - нагрев при обработке и последующее охлаждение вызывают температурное расширение образца в креплении, изменяя характер напряжений и деформаций.

Как уже отмечалось, наиболее точные метрологические измерения достигаются, когда оптический элемент зафиксирован в условиях, максимально приближенных к свободному состоянию. В вертикальных измерительных конфигурациях (при горизонтальном расположении оптической поверхности) гравитационный прогиб можно рассчитать с помощью математического моделирования, учитывающего механические свойства материала и геометрические параметры оптического элемента. Однако критически важным остается требование точного воспроизведения той же пространственной конфигурации при возврате обрабатываемой детали в камеру IBF после измерений.

1.4.3. Расчет обработки

При проведении обработки с использованием широкоапертурного сильноточного ионного пучка распределение удаляемого с поверхности материала зависит от траектории движения заготовки относительно ионного источника и от профиля обрезающей ионный пучок диафрагмы. Возможности данного метода обсуждаются в главе 3.

Алгоритмы расчета времени экспозиции

Для проведения коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком необходимо рассчитать время нахождения ионного пучка во всех положениях над поверхностью детали, имея в качестве входных данных карту отклонения формы поверхности от расчетной и профиль ионного пучка. Основной подход к расчёту времени экспозиции заключается в том, что глубина ионной обработки может быть представлена уравнением свертки $R(x,y)=BRF(x,y)*t(x,y)$, где $R(x,y)$ – распределение глубины ионной обработки, $BRF(x,y)$ – функция удаления материала, а $t(x,y)$ – искомое

распределение времени обработки. Для коррекции измеренного профиля поверхности $S(x,y)$ необходимо чтобы глубина ионной обработки соответствовала этому профилю $S(x,y) = R(x,y)$. Таким образом необходимо решить обратную задачу – деконволюцию между измеренным профилем ошибок S и характеристической функцией BRF .

На практике решение данной задачи не тривиально. Существует несколько подходов к решению этой задачи. Их можно разделить на три основных класса: решения, основанные на преобразовании Фурье [83-85], решения, использующие методы линейной алгебры [55,86], и решения, использующие функциональное представление [87]. У каждого из этих подходов есть как достоинства, так и недостатки.

Методы, основанные на преобразовании Фурье

Решение, использующее преобразование Фурье было показано, например, в работе [83]. Основная идея данного подхода состоит в том, что операция свёртки, которой описывается взаимодействие пучка с поверхностью, заменяется простым умножением при переходе в частотный спектр. Использование быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяет сделать расчёт быстрым, а использование порогового фильтра позволяет снизить влияние шумов на ответ. Главным недостатком такого подхода является необходимость «виртуального» расширения заготовки таким образом, чтобы входные данные были подходящей размерности для БПФ, при этом результат расчёта всегда будет зависеть от способа расширения карты поверхности. Кроме того, выбор порогового значения также влияет на ответ.

Использование методов линейной алгебры

С другой стороны, операция свёртки может быть представлена в виде матричного умножения, что было показано в работе [55]. В такой формулировке для вычисления ответа требуется только знание поверхности, расширения поверхности не требуется. Время обработки поверхности вычисляется методом наименьших квадратов с помощью разложения по сингулярным значениям. Такой способ является более вычислительно затратным, чем использование БПФ, кроме того, данный метод подвержен влиянию шумов.

Использование функционального представления

Согласно данному подходу искомое время экспозиции ионного пучка в первом приближении пропорционально ошибке формы поверхности, а коэффициент пропорциональности может быть найден из минимизации целевой функции, которая участвует в оценке качества поверхности [87]. Затем моделируется ионное травление, согласно времени экспозиции ионного пучка и вычисляется новая поверхностная ошибка, для которой также находится оптимальное время обработки. Вычисления продолжаются итерационно, пока не будет достигнут требуемый уровень точности. Данный метод прост в реализации и позволяет проводить коррекцию, однако в ходе обработки на поверхности формируется высокочастотный рельеф, повторяющий распределение неоднородностей исходной поверхности. [88]

Методы использующий БПФ, являются эффективными с точки зрения вычислений и способны находить оптимальные решения за очень короткое время. Однако они, как правило, менее гибкие, чем матричные методы.

При решении задачи деконволюции для нахождения времени экспозиции измеренные данные по рабочей области оптической поверхности должны быть расширены как минимум на радиус ионного пучка, чтобы обеспечить обработку края. Непрерывность на границе оптической поверхности важна для минимизации остаточных значений; однако высота экстраполированного профиля за пределами оптической поверхности должна быть небольшой, чтобы сократить общее время обработки. Таким образом, оптимальное расширение поверхности для конкретной поверхности обычно зависит от характера измеряемой поверхности, выраженности высоко- и низкочастотных особенностей, а также от поведения поверхности на границах.

Критерии оценки качества поверхности при ионно-пучковой обработке.

Для проведения локальной обработки необходимо ввести параметр, описывающий качество поверхности. Большинство методов расчёта в качестве метрики учитывают погрешность по высоте корректируемой поверхности, параметр PV либо СКО. Однако погрешность по наклону является не менее важным показателем, особенно для зеркал скользящего падения. Уменьшение погрешности по высоте обычно также уменьшает погрешность по наклону, но можно представить поверхности с малым отклонением по высоте и существенным разбросом по углу, например, дифракционная решётка.

Было показано, что метод обработки, в котором чередовались оптимизируемые целевые функции высоты и наклона, эффективно уменьшает ошибки как по высоте, так и по наклону на двумерных поверхностях [89]. Этот метод работает путем итеративной оптимизации сначала ошибки по высоте, а затем ошибки по наклону СКО (dz/dx), СКО (dz/dy) пока не будет найдено решение, минимизирующее ошибки по высоте и наклону до требуемой точности. С помощью этого подхода в работе [7] была продемонстрирована обработка эллиптической подложки зеркала с погрешностью по параметру СКО поверхности 0.36 нм и погрешностью по наклону 150 нрад в пределах области 150 мм × 20 мм.

1.5. Требования к методике IBF

В последние годы ионно-пучковая обработка (IBF) подтвердила свою эффективность в качестве перспективного метода коррекции формы оптических элементов. Технология демонстрирует универсальность при обработке плоских и криволинейных поверхностей, отсутствие краевых эффектов и совместимость с материалами рентгеновской оптики (Si, SiO₂).

Современные требования к форме оптической поверхности рентгеновского зеркала (погрешности высоты <1 нм, наклона < 1 мкрад на протяженных участках в сотни миллиметров) находятся на границе возможностей метода. Достижение таких параметров требует комплексного решения задач: контроль позиционирования и юстировки системы; стабилизация характеристик ионного пучка; развитие прецизионной метрологии для верификации результатов; повышение производительности обработки. Ключевое значение приобретают алгоритмы обработки данных и оптимизация процесса ионной обработки, что позволяет выйти на субнанометровый уровень точности.

Таким образом, всё ужесточающиеся требования к качеству поверхности рентгенооптических элементов заставляют развивать методику IBF, как с точки зрения математического описания процесса травления, так и оптимизации его практической реализации. В рамках данной работы разработаны новые математические подходы, позволившие повысить точность и расширить диапазон возможностей методики ионно-пучковой обработки поверхности подложек рентгенооптических элементов, и реализовано технологическое оборудование, отвечающее современным требованиям развития высокоточной рентгеновской оптики.

Глава 2. Установка ионно-пучковой обработки оптических элементов

Для проведения контролируемой ионно-пучковой обработки оптических поверхностей необходим контроль двух ключевых параметров: скорости ионного распыления (определяемой коэффициентом распыления) и эволюции шероховатости поверхности в процессе травления. Опыт, накопленный нашим коллективом и ведущими зарубежными научными группами, подтверждает возможность достижения атомарной гладкости поверхностей при ионном травлении.

2.1 Исследование распыления рентгенооптических материалов.

Физические основы процесса ионного распыления детально описаны в ряде работ. Наиболее полная и непротиворечивая теория, описывающая коэффициент распыления аморфных материалов, была разработана Зигмундом [90]. Она рассматривает распыление как результат каскада атомных столкновений. В свою очередь, концептуальное объяснение эволюции микрошероховатости было дано в модели Бредли-Харпера [91]. Согласно этой модели, баланс между шероховатостью, индуцированной различной скоростью распыления в зависимости от локального угла падения ионов, и поверхностной диффузией определяет итоговую топографию поверхности. Несмотря на существование этих моделей, практическое применение ионно-пучковой обработки требует точных экспериментальных данных о коэффициенте распыления и эволюции шероховатости для конкретных материалов и условий.

Таким образом, перед проведением ионно-пучковой обработки необходимо экспериментально исследовать поведение шероховатости и коэффициента распыления для конкретных оптических материалов, которые могут быть аморфными либо кристаллическими. Ранее в работах нашего коллектива [64,72,92] были детально изучены параметры распыления плавленого кварца (SiO_2) – одного из наиболее распространенных материалов подложек для многослойных рентгеновских зеркал. Было установлено, что травление ионами Ag с энергией 500–1250 эВ обеспечивает эффективное сглаживание шероховатости до уровня $\sigma_{\text{eff}} \sim 0.25$ нм.

Целью настоящей работы стало расширение базы экспериментальных данных на другие перспективные оптические материалы. Их выбор обусловлен эксплуатационными

требованиями. Для рентгеновской оптики, работающей с высокоинтенсивными пучками СИ, определяющее значение имеют теплофизические свойства материалов подложек, определяющие их стойкость к термоиндуцированным искажениям (α/k). Для космических применений, где ключевым параметром становится устойчивость к деформациям под действием сил тяжести и вибраций, важна высокая удельная жёсткость (E/ρ). В таблице 2.1. приведены теплофизические и механические характеристики различных материалов. Согласно данной таблице наиболее перспективными материалами для работы с СИ является монокристаллический кремний, а для космических применений перспективным материалом является сапфир.

Таблица 2.1. теплофизические и механические характеристики различных материалов

Материал	α , $K^{-1} \cdot 10^{-6}$	K , Вт/(м*К)	E , ГПа	ρ , г/см ³	α/k	E/ρ
Сапфир	5	27	320	3.9	0.18	82
Кварц	0.55	1.4	70	2.65	0.39	26.4
Кремний	2.10	149	135	2.33	0.013	57.9
Медь	16.7	401	120	8.93	0.04	13.4
Алмаз	1.1	2230	140	3.53	0.0005	39.7
Бериллий	11.2	201	300	1.85	0.05	162

В рамках данной диссертационной работы были проведены комплексные исследования распыления монокристаллического сапфира, и монокристаллического кремния различных ориентаций ионами аргона, неона и ксенона. Выбор именно благородных газов обусловлен их химической инертностью, которая исключает химические процессы и обеспечивает физический механизм распыления. Это обеспечивает высокий контроль над процессом и воспроизводимость результатов обработки, что является критически важным для создания прецизионной рентгеновской оптики.

На экспериментальной установке ионного травления [93] была проведена серия экспериментов по исследованию коэффициента распыления и наблюдению за эволюцией микрошероховатости этих материалов. Экспериментальная установка оснащена источником ускоренных ионов КЛАН-103М с квазипараллельным ионным пучком и поворотным столиком для регулировки угла падения ионов. Для обработки диэлектриков применяется накальный нейтрализатор. Коэффициент распыления определялся согласно формуле 1.4 опираясь на измерение глубины ионного травления. Контроль глубины травления осуществляется методом маскирования: на границе защищённой области формировалась ступенька, высоту которой измеряли с помощью интерференционного микроскопа белого света. Характеристики микрошероховатости исследовали методом атомно-силовой микроскопии на приборе Ntegra Prima (NT-MDT) с последующим спектральным анализом. Эффективная шероховатость σ_{eff} определялась как площадь под кривой спектральной плотности мощности (Power spectral density PSD). Измерительный комплекс и методика детально описаны в работе [94].

В результате исследования были определены оптимальные параметры ионно-пучковой обработки.

2.1.1 Исследование монокристаллического кремния

В качестве экспериментальных образцов использовались стандартные кремниевые подложки для микроэлектронной промышленности [95] с кристаллографическими ориентациями $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, нарезанные на пластины размером 15×15 мм. Исходная шероховатость поверхности составляла $\sigma \sim 0.25$ нм. Для каждой ориентации были изучены эволюция шероховатости и коэффициент распыления при воздействии ионов аргона, неона и ксенона. Эксперименты проводились в широком диапазоне энергий ионов от 200 до 1500 эВ и углов падения от 0° (нормальное падение) до 85° относительно нормали к поверхности образца.

На рисунке 2.1 представлены экспериментальные зависимости коэффициента распыления и эффективной шероховатости поверхности монокристаллического кремния с ориентацией $\langle 100 \rangle$ от энергии ионов аргона.

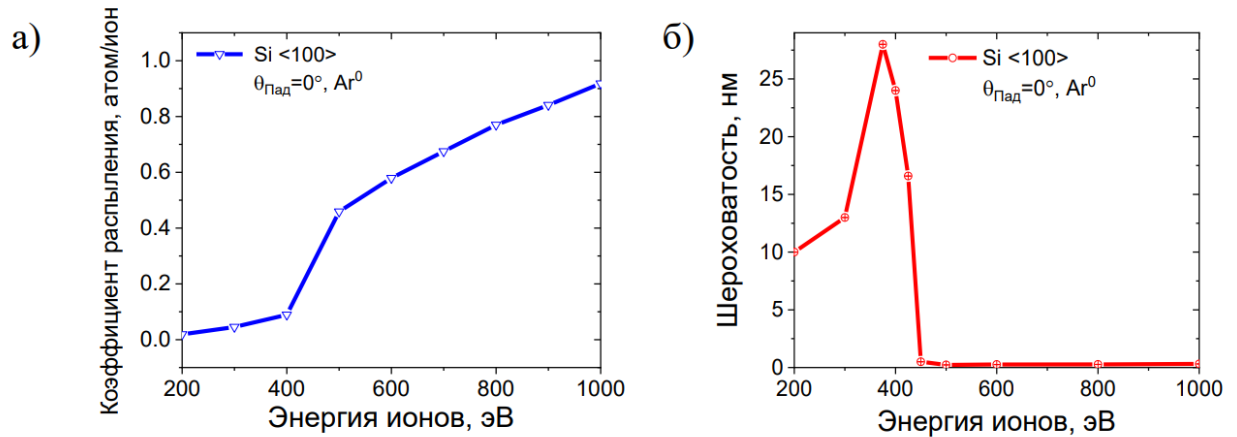


Рисунок 2.1 Зависимости коэффициента распыления (а) и значения эффективной шероховатости поверхности (б) Si <1 0 0> от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ mA/cm}^2$; $\theta = 90^\circ$.

Полученные результаты демонстрируют, что при энергиях ионов выше $\sim 430 \text{ эВ}$ наблюдается сглаживание поверхности на фоне монотонного роста коэффициента распыления, что подтверждает перспективность использования IBF для изготовления прецизионной рентгенооптики на основе кремния <100>.

Аналогичные исследования, проведённые для ориентаций <110> и <111>, выявили похожее поведение зависимостей коэффициента распыления и шероховатости. Отличие заключается в смещении пороговой энергии: для данных ориентаций – резкое изменение характеристик происходит при энергии ионов $\sim 550 \text{ эВ}$, что выше значения, наблюдавшегося для ориентации <100> (Рисунки 2.2, 2.3).

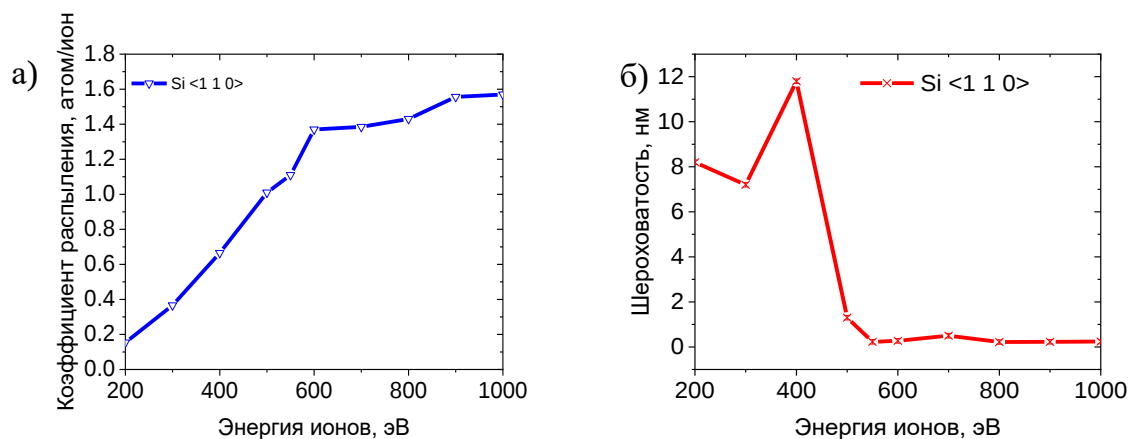


Рисунок 2.2 Зависимости коэффициента распыления (а) и значения эффективной шероховатости поверхности (б) Si <1 1 0> от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ мА/см}^2$; $\theta = 90^\circ$.

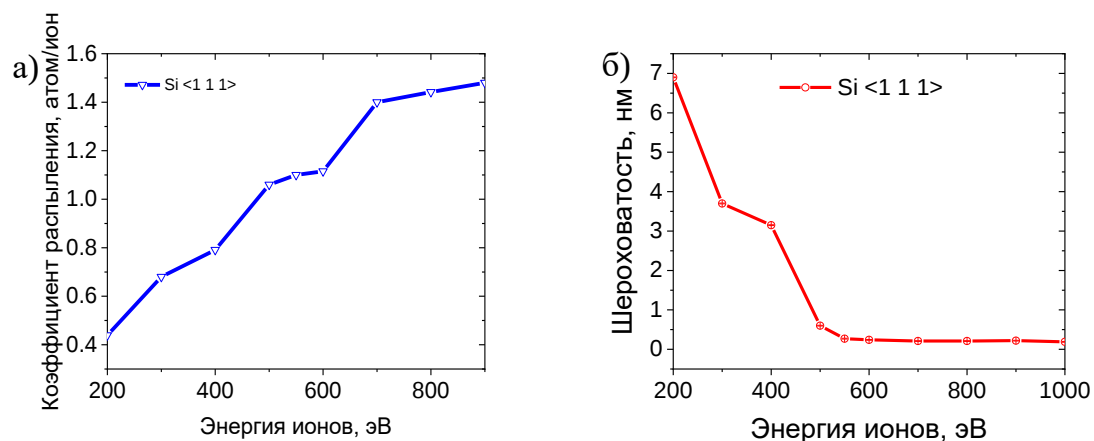


Рисунок 2.3 Зависимости коэффициента распыления (а) и значения эффективной шероховатости поверхности (б) Si <1 1 1> от энергии ионов аргона. Параметры экспериментов: $j = 0.7 \text{ мА/см}^2$; $\theta = 90^\circ$.

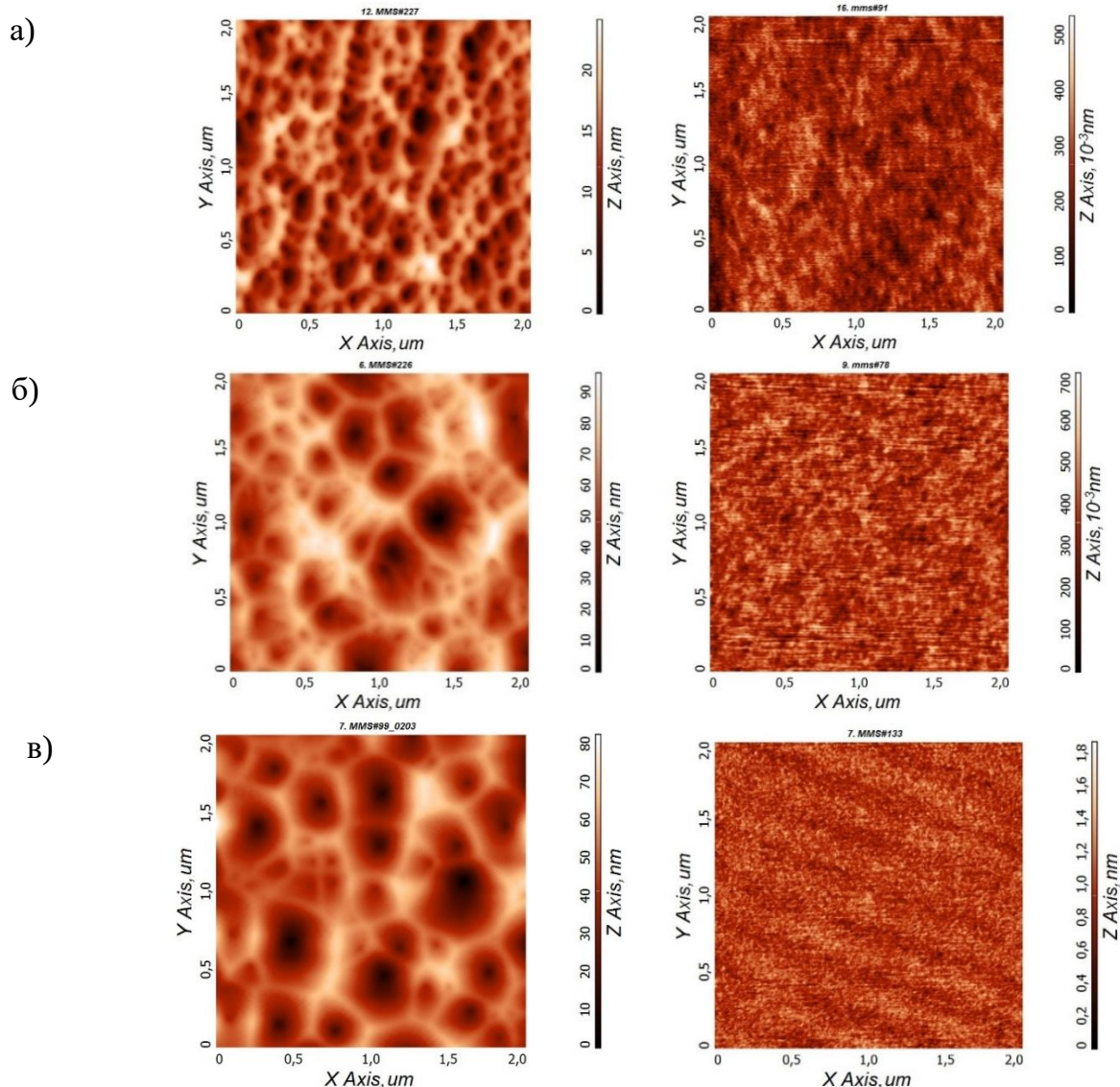


Рисунок 2.4 АСМ кадры поверхностей монокристаллического кремния, травленного ионами аргона с энергией 400 эВ (слева) и 800 эВ (справа): (а) – Si $\langle 1\ 1\ 1 \rangle$; (б) – Si $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$; (в) – Si $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ – после облучения под нормалью ускоренными ионами аргона с энергией 400 эВ.

Проведенные исследования выявили схожее влияния энергии ионов на морфологию поверхности. При энергии ионов 400 эВ наблюдается деградация поверхности с образованием многочисленных ям с поперечным размером до 500 нм и глубиной до 100 нм (рисунок 2.4). Увеличение энергии до 800 эВ обеспечивает эффективное сглаживание поверхности для всех ориентаций, позволяя сохранять шероховатость на уровне $\sigma < 0.3$ нм. Во всех вышеописанных экспериментах глубина ионного травления составляла 2-3 мкм.

В результате серии экспериментов по распылению мишеней из основных кристаллографических ориентаций монокристаллического кремния ускоренными ионами неона (Ne) в диапазоне энергий 100-1000 эВ также были получены энергетические зависимости коэффициентов распыления и значений эффективной шероховатости поверхности (рисунки 2.5, 2.6, 2.7)

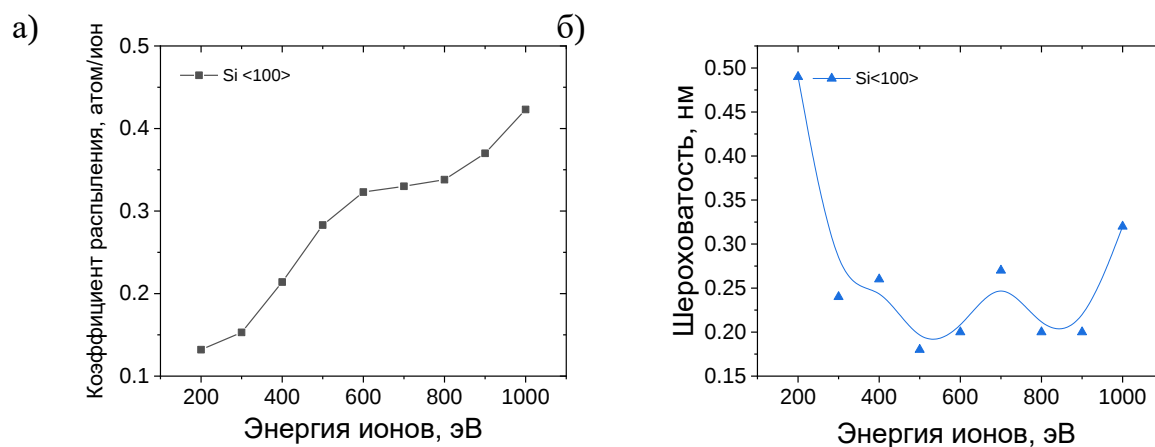


Рисунок 2.5 Энергетические зависимости коэффициента распыления (а) и значений эффективной шероховатости (б) монокристаллического кремния <1 0 0>.

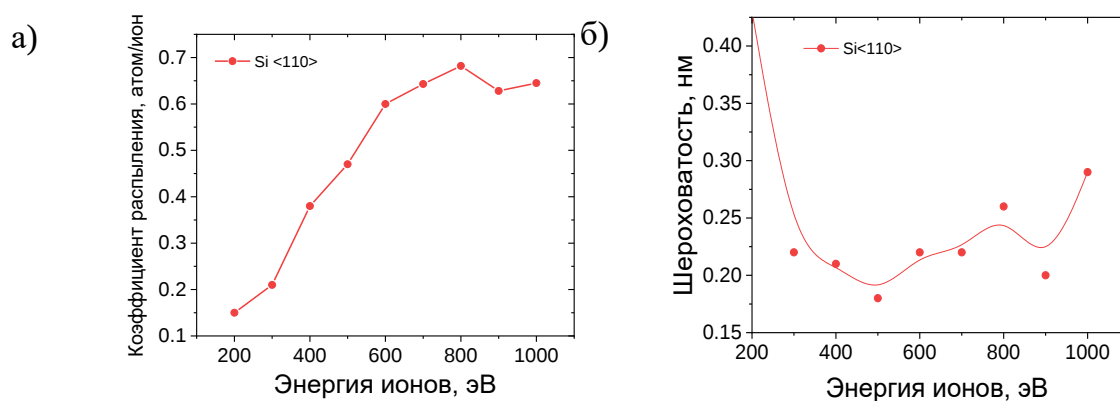


Рисунок 2.6 Энергетические зависимости коэффициента распыления (а) и значений эффективной шероховатости (б) монокристаллического кремния <1 1 0>.

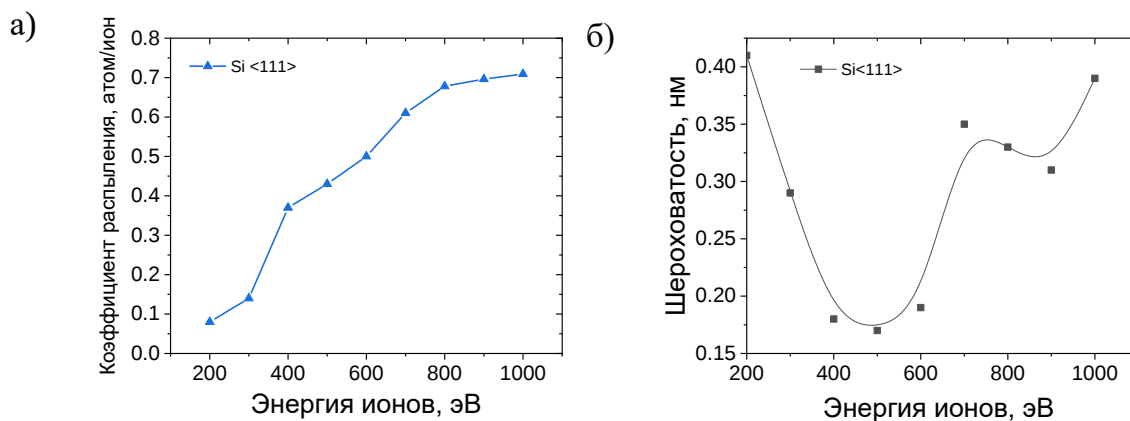


Рисунок 2.7 Энергетические зависимости коэффициента распыления (а) и значений эффективной шероховатости (б) монокристаллического кремния <1 1 1>.

Сравнительный анализ выявил, что коэффициент распыления при облучении ионами неона для всех исследованных ориентаций ниже, чем при использовании аргона. На энергетических зависимостях шероховатости наблюдается схожая картина для всех трёх ориентаций – развитие рельефа поверхности начинается уже при энергиях ~ 200 эВ. Однако, в отличие от экспериментов с аргоном, для неона не удалось зафиксировать резкого скачка шероховатости. Это объясняется крайне низкой скоростью травления: при энергии 100 эВ коэффициент распыления составляет 0.005 атомов / ион, что соответствует скорости удаления материала всего 0.25 нм/мин, что недостаточно для статистически значимой характеристики эволюции поверхности за разумное время эксперимента. Тем не менее, на АСМ-изображениях 2×2 мкм (рисунок 2.8) наблюдается начало образования кратеров, свидетельствующее о начальной стадии развития шероховатости. Минимальная глубина травления составила 60 нм.

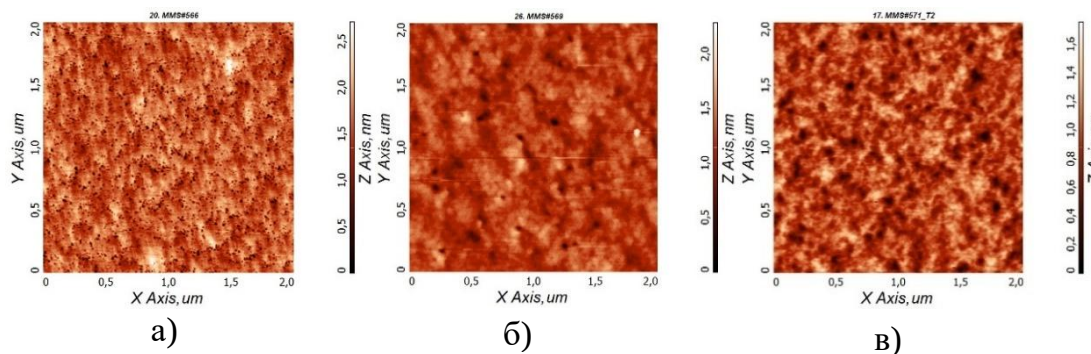


Рисунок 2.8 АСМ кадры 2×2 мкм поверхностей основных ориентаций (а – Si<100>; б - Si<110>; в - Si<111>); монокристаллического кремния после облучения ионами Ne с энергией 100 эВ.

Эксперименты по травлению ионами ксенона (Xe) подтвердили общий характер выявленных закономерностей для всех трёх кристаллографических ориентаций.

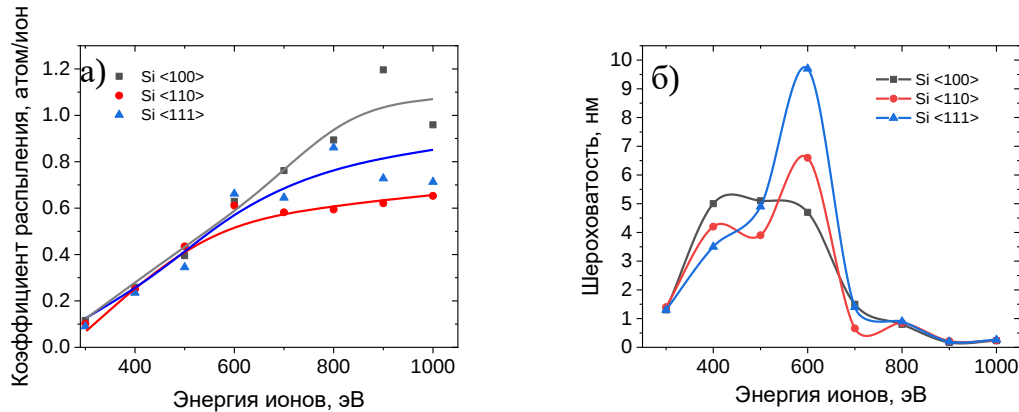


Рисунок 2.9 Зависимости коэффициентов распыления (а) и значения эффективной шероховатости поверхности (б) основных ориентаций монокристаллического кремния от энергии ионов ксенона.

Как следует из рисунка 2.9, пороговое значение энергии, соответствующее резкому изменению шероховатости, для более тяжёлых ионов ксенона смещается в область >750 эВ, при этом величина коэффициента распыления сопоставима с значениями, полученными для аргона. Таким образом, для всех исследованных ориентаций монокристаллического кремния и рабочих газов возможно подобрать режимы обработки, обеспечивающие как высокую скорость удаления материала, так и требуемое для рентгенооптических применений качество поверхности.

2.1.2 Изучение распыления монокристаллического кремния от угла падения ионов

Рассмотрим влияние угла падения ионов на коэффициент распыления и эволюцию шероховатости поверхности. На рисунке 2.10 представлены экспериментальные зависимости среднеквадратической шероховатости от угла падения ионов для монокристаллического кремния ориентации <100> при энергиях 300 и 400 эВ.

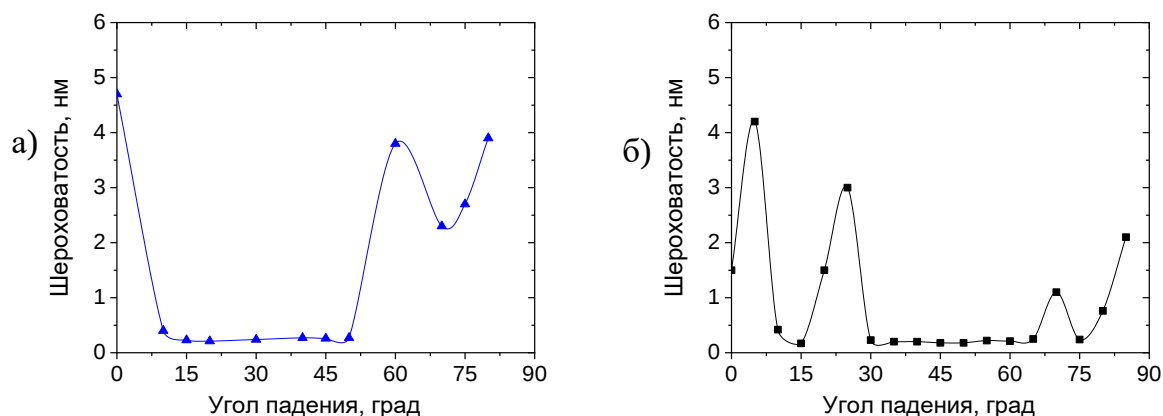


Рисунок 2.10 Зависимость шероховатости поверхности Si <100> от угла падения $E_{\text{ионов}}$ - 300 эВ (а) и 400 эВ (б). Параметры эксперимента: ионы – Ar; $J=0.7 \text{ мА/см}^2$; глубина травления $\sim 2 \text{ мкм}$.

В отличие от гладких угловых зависимостей, характерных для аморфных материалов, полученные кривые демонстрируют выраженную осциллирующую структуру с несколькими максимумами и минимумами, что свидетельствует о существенном влиянии кристаллической структуры на процесс формирования поверхности. На рисунке 2.11 показаны соответствующие угловые зависимости коэффициента распыления, которые также демонстрируют немонотонный характер.

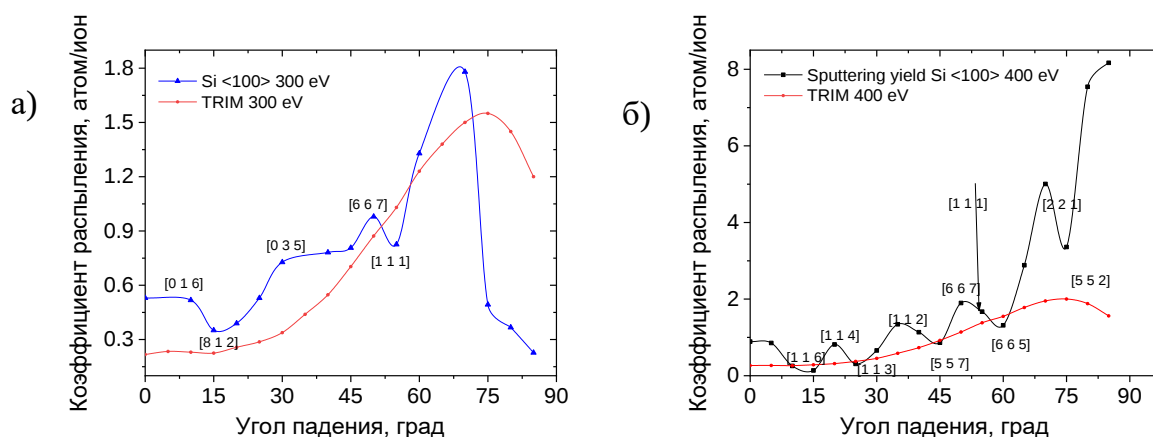


Рисунок 2.11 Зависимость коэффициента распыления Si <100> от угла падения $E_{\text{ион}}$ - 300 эВ (а) и 400 эВ (б). Параметры эксперимента: ионы – Ar; $J=0.7 \text{ мА/см}^2$; глубина травления $\sim 2 \text{ мкм}$.

На рисунке 2.12 представлены угловые зависимости коэффициента распыления и шероховатости поверхности для образцов с ориентацией $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, и энергии ионов аргона $E_{\text{ионов}} = 800$ эВ.

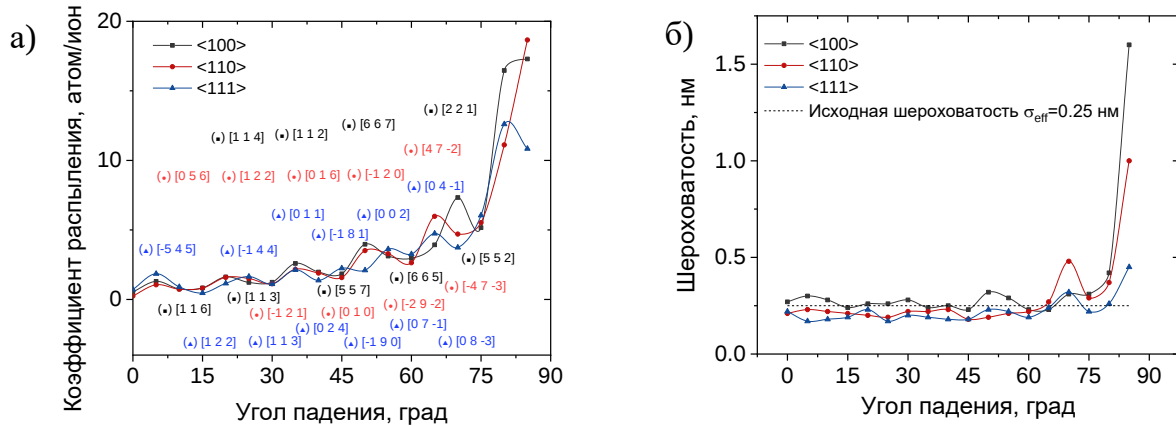


Рисунок 2.12 Зависимость коэффициента распыления (а) и шероховатости поверхности (б) Si $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ от угла падения. Параметры эксперимента: ионы – Ar; $E_{\text{ионов}} = 800$ эВ; $J = 0.7$ мА/см²; глубина травления ~ 2 мкм.

Экспериментально установлено, что для всех рассмотренных ориентаций монокристаллического кремния при энергии ионов 800 эВ в отличие от более низких энергий (300-400 эВ) шероховатость сохраняется на уровне $\sigma_{\text{eff}} < 0.3$ нм в широком диапазоне углов падения (0-70°). Такое "аморфоподобное" поведение угловой зависимости позволяет проводить ионно-пучковую обработку сложных поверхностей из монокристаллического кремния как малоразмерным, так и широкоапертурным пучком без риска деградации микрорельефа, поскольку локальные углы падения на реальных оптических поверхностях могут варьироваться в указанном диапазоне. Это открывает возможность осуществления асферизации и коррекции формы с существенной глубиной удаления материала при сохранении качества поверхности, приемлемого для рентгенооптических применений.

2.1.3 Исследование распыления монокристаллического сапфира

В качестве объектов исследования использовались диски диаметром 25 мм и толщиной 3 мм, вырезанные из а-среза монокристаллического сапфира с ориентацией, повёрнутой на 3° относительно нормали к поверхности. Кристаллографическая ориентация подтверждена методом рентгеновской дифракции. Исходная эффективная шероховатость

σ_{eff} составляла ~ 0.7 нм в диапазоне пространственных частот $0.049\text{--}63$ мкм^{-1} . На рисунке 2.13 представлены АСМ-изображения исходной поверхности сапфира в масштабах 2×2 и 40×40 мкм с соответствующими PSD-спектрами и значениями σ_{eff} . На кадре 40×40 мкм видны характерные царапины после механической обработки.

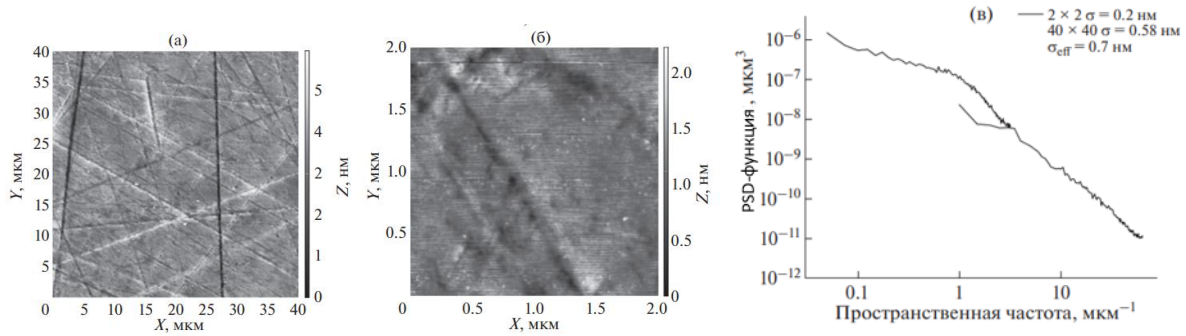


Рисунок 2.13 АСМ-изображения исходной поверхности монокристаллического сапфира размером 2×2 (а) и 40×40 мкм (б) и соответствующая PSD-функция поверхности (в)

В ходе работы получены экспериментальные зависимости скорости травления монокристаллического сапфира от энергии ионов аргона и угла их падения. На рисунке 2.14 представлены соответствующие данные, включая сравнение с расчетными значениями коэффициента распыления, полученными с помощью программного пакета TRIM [96].

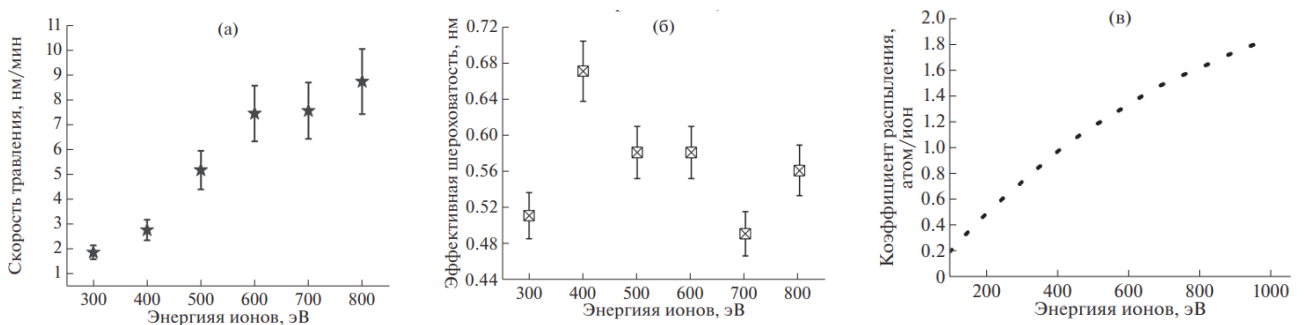


Рисунок 2.14 (а) Экспериментальная зависимость скорости травления монокристаллического сапфира от энергии ионов аргона; (б) экспериментальная зависимость значения эффективной шероховатости поверхности монокристаллического сапфира от энергии ионов аргона; (в) расчетная зависимость коэффициента распыления сапфира от энергии ионов аргона.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых показывает их качественное соответствие. При этом в области 800 эВ насыщение скорости травления еще не

наблюдается (рисунок 2.14а). Анализ шероховатости (рисунок 2.14б) демонстрирует эффективное сглаживание поверхности во всем исследованном диапазоне энергий, с оптимумом при 700 эВ. Соответствующие АСМ-изображения и PSD-функции (рисунок 2.15) подтверждают устранение следов механической полировки, что проявляется в снижении PSD-функции при пространственных частотах выше 0.1 мкм^{-1} .

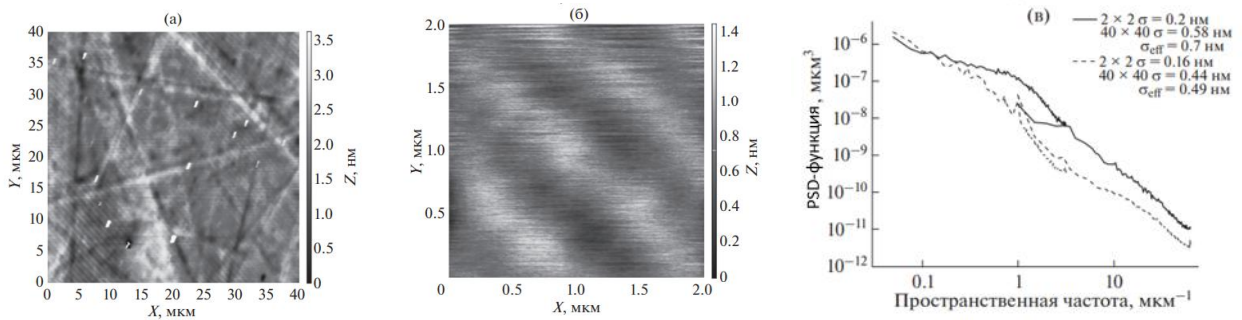


Рисунок 2.15. АСМ-изображения поверхности монокристаллического сапфира размером 2×2 (а) и 40×40 мкм (б) после обработки ускоренными ионами аргона с энергией 700 эВ при плотности ионного тока 0.7 мА/см^2 ; пространственный спектр шероховатости (в).

На основе этих результатов проведена серия экспериментов при фиксированной энергии 700 эВ. На рисунке 2.16 представлены угловые зависимости скорости травления и шероховатости в сравнении с расчетными данными для аморфного Al_2O_3 . Угловая зависимость скорости травления сапфира демонстрирует немонотонный характер с максимумом при 40° (рисунок 2.16а), что свидетельствует о существенном влиянии кристаллической структуры. В отличие от этого, зависимость для аморфного материала (рисунок 2.16в) следует характерной зависимости $\sim 1/\cos\Theta$ [90, 97].

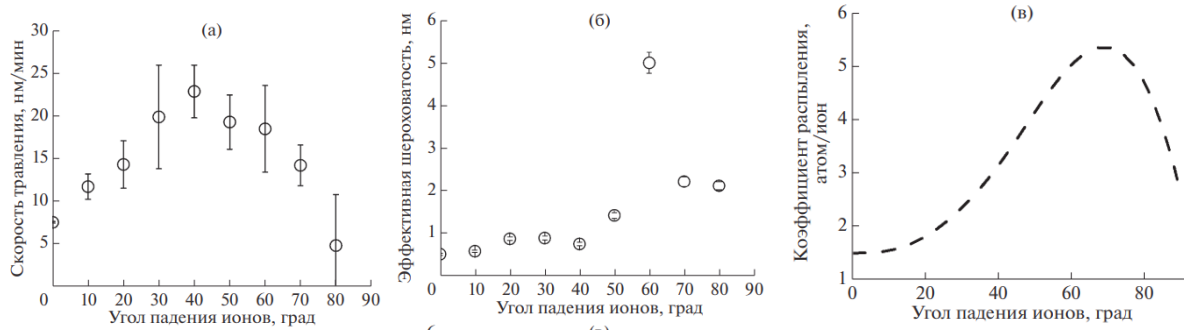


Рисунок 2.16. (а) Экспериментальная зависимость скорости травления монокристаллического сапфира от угла падения ионов аргона; (б) экспериментальная зависимость значения эффективной шероховатости поверхности монокристаллического сапфира от угла падения ионов аргона; (в) расчетная зависимость коэффициента распыления сапфира от угла падения ионов аргона.

Сравнение с литературными данными показывает, что скорость травления сапфира (~ 7.5 нм/мин) при одинаковых параметрах пучка существенно ниже, чем для монокристаллического Si (~ 50 нм/мин) и SiO_2 (~ 35 нм/мин) [97]. Несмотря на это, полученная скорость позволяет формировать рельеф с значительной стрелкой прогиба.

Анализ шероховатости выявил оптимальные результаты при нормальном падении ионов. В диапазоне углов $20^\circ - 40^\circ$ эффективная шероховатость остается стабильной, с незначительными отклонениями в области высоких пространственных частот ($3.7\text{--}63.5$ мкм $^{-1}$, рисунок 2.17а). При углах 60° наблюдается образование волнистой структуры (ripples) [91], представленной на АСМ-изображениях (рисунок 2.17б).

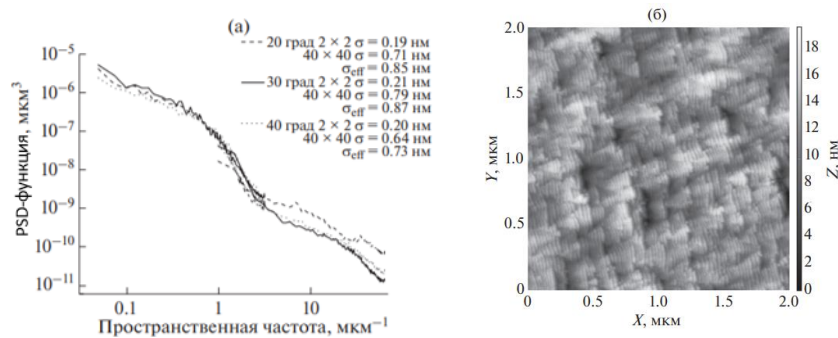


Рисунок 2.17. (а) PSD-функции поверхностей, облученных ускоренными ионами аргона с энергией 700 эВ, соответствующие углам падения пучка на поверхность образца $20^\circ - 40^\circ$; (б) Волнообразная структура на поверхности образца, полученная в результате травления ионами аргона при падении пучка под углом 60° к поверхности образца.

Проведенное исследование демонстрирует перспективность использования ионно-пучкового травления для обработки монокристаллического сапфира с возможностью сохранения и улучшения микрорельефа поверхности.

2.1.4 Результаты исследования распыления монокристаллического кремния и сапфира

На основании проведенных исследований были установлены оптимальные режимы ионно-пучковой обработки для перспективных материалов рентгенооптики. Для монокристаллического кремния была подтверждена возможность ионной полировки для достижения шероховатости $\sigma_{\text{eff}} < 0.3$ нм. Было установлено, что с ростом энергии ионов улучшается шероховатость поверхности и увеличивается скорость обработки. Среди изученных газов аргон является наиболее технологичным, так как демонстрирует наилучшее сочетание скорости обработки, качества поверхности, и доступности.

Для монокристаллического сапфира оптимальным режимом обработки является обработка ионами аргона с энергией 700 эВ при углах падения в диапазоне 0-40°.

Полученные результаты демонстрируют возможность прецизионного формообразования оптических элементов из кремния и сапфира с сохранением атомарной гладкости поверхности и открывают возможность формирования подложек для зеркал скользящего падения, работающих под мощными пучками рентгеновского излучения (востребованных в первую очередь на современных синхротронах 4 и 4+ поколения), а также для космических миссий, где важна удельная жесткость.

2.2 Разработка технологической установки ионно-пучкового травления

В рамках диссертационной работы была разработана установка ионно-пучковой обработки оптических элементов. За основу была взята конструкция, описанная в [69]. Разработка велась с учетом анализа ионно-пучковых методик [72, 98] и на основе проведенных исследований распыления различных материалов, в том числе описанных в предыдущем параграфе [99,100]. В результате, созданная установка сочетает в себе три ключевые функции: полировку и асферизацию широкоапертурным сильноточным источником, а также коррекцию локальных ошибок формы малоразмерным сфокусированным пучком. В отличие от прототипа, установка оснащена тремя специализированными источниками ионов. Широкоапертурный источник КЛАН-163М с квазипараллельным пучком обеспечивает полировку и асферизацию через

формирующую диафрагму. Дополнительно применены два модифицированных источника с фокусировкой пучка (КЛАН-53М и КЛАН-12М), установленные на моторизованных платформах. Такое решение позволяет подводить источник к поверхности детали, за счёт чего можно изменять размер и форму ионного пучка. Фокусирующие ионные источники предназначены для безмасочной коррекции локальных ошибок формы. Модель разработанной установки ионно-пучковой обработки оптических подложек и схема 5-ти координатного стола для обрабатываемых деталей приведены на рисунке 2.18.

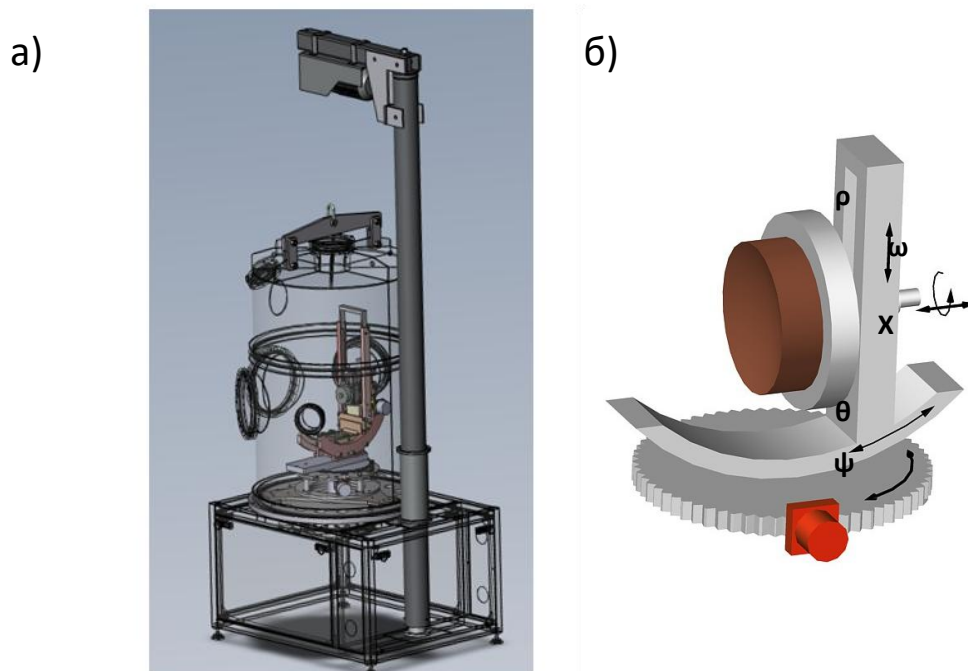


Рисунок 2.18. Модель установки ионно-пучкового травления (а) и схема 5-ти координатного стола для обрабатываемых образцов с указанием возможных перемещений (б).

Установка состоит из вакуумной камеры (рисунок 2.18а), оснащенной тремя источниками ускоренных ионов и системой позиционирования образцов с пятью степенями свободы (рисунок 2.18б). Кроме того, имеется вращающаяся заслонка, выполняющая двойную функцию: перекрытие ионного пучка и измерение ионного тока. Вакуумная система включает форвакуумный и турбомолекулярный насосы, обеспечивающие остаточное давление $7.5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Автоматизированная система управления на базе РС-

совместимого контроллера I-8431 (ICP DAS, Тайвань) с процессором AM186ES осуществляет полный контроль установки – от вакуумной откачки и управления газовой средой до регулировки параметров ионных источников и позиционирования образца.

2.2.1. Описание стола для образцов и системы позиционирования

В установке реализована схема сканирования с неподвижными ионными источниками и перемещаемой заготовкой. Пятикоординатная система позиционирования с шаговыми двигателями обеспечивает точное перемещение образца, а дополнительная шестая ось управляет поворотным механизмом заслонки. Ионные источники с фокусирующей ионно-оптической системой (ИОС) закреплены на линейных трансляторах, что позволяет отодвинуть источник из рабочего положения при загрузке образца. Изменение зазора между ионно-оптической системой и образцом позволяет изменять параметры функции удаления материала и осуществлять сканирование по каустике ионного пучка. Точная юстировка системы обеспечивается микрометрическими винтами на держателях источников. Подвижные источники оснащены собственными заслонками, также выполняющими двойную функцию: измерения ионного тока при калибровке и экранирование пучка в нерабочем режиме. Полные технические характеристики и параметры движения всех осей системы приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Назначение и диапазон изменения возможных перемещений

Назначение	Диапазон изменений	Минимальный шаг
Наклон образца, (θ)	$\pm 35^\circ$	0.01°
Вращение вокруг оси образца, (ω)	0° - 360°	0.01°
Линейное перемещение вдоль оси образца, (X)	0-50 мм	0.02 мм
Линейное перемещение поперек оси образца, (p)	0-160 мм	0.02 мм
Поворот вокруг вертикальной оси, (ψ)	0° - 120°	0.01°
Поворот заслонки, (ϕ)	on-off	-
Перемещение фокусирующего источника 1, (L1)	0-200 мм	0.02 мм
Перемещение фокусирующего источника 2, (L2)	0-200 мм	0.02 мм

Ионные источники установлены по окружности вакуумной камеры с интервалом 60 градусов. Оси ионных пучков всех источников находятся в одной плоскости и

пересекаются в центре установки (точка пересечения всех осей системы позиционирования). Вращением системы позиционирования вокруг вертикальной оси (ψ) выбирается направление на ионный источник, который будет использоваться для данной операции. За счет трех степеней свободы (ω , X и ρ) любая точка поверхности произвольной формы (выпуклая, вогнутая) может быть выведена на центр системы позиционирования. Для этого задаются полярные координаты точки (ω и ρ), а также выбирается стрелка прогиба (X) по формуле 2.1:

$$X = x_0 + R \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\rho}{R}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2R}\right)^2} \right) \quad (2.1)$$

Для установки локальной нормали в данной точке производится наклон образца 2.2:

$$\theta = \arcsin \frac{\rho}{R} \quad (2.2)$$

x_0 – толщина образца; D – диаметр образца; R – радиус кривизны образца (задается с учетом знака: $R > 0$ – вогнутая поверхность; $R < 0$ – выпуклая поверхность)

Перед началом обработки поверхности широкоапертурным ионным источником выполняется прогрев источника при закрытой заслонке с одновременной установкой всех рабочих параметров процесса, после чего заслонка (ϕ) открывается для начала обработки. В случае использования малоразмерного ионного пучка соответствующий источник (L1 или L2) предварительно перемещается к поверхности детали, устанавливается на фокусное расстояние ИОС, при этом во время движения источника ускоряющее напряжение на сетках отключается (ионный пучок деактивируется) в целях безопасности и предотвращения неконтролируемого воздействия на обрабатываемую поверхность.

Благодаря наличию трёх источников ионов в данной установке возможно реализовать все методики ионно-пучковой обработки поверхности, а именно, полировка, асферизация и коррекция. При необходимости произвести заданную операцию подложка просто поворачивается в направлении нужного источника.

Таким образом, комбинированное использование источников позволяет существенно повысить эффективность обработки. Грубая асферизация с большим удалением материала выполняется сильноточным широкоапертурным источником. Для коррекции локальных ошибок в зависимости от их масштаба применяются два режима: источник с

крупным пучком и высоким током используется для глубокого травления и обработки габаритных деталей, а источник с малым пучком и низким током — для финишной коррекции. Важным технологическим преимуществом установки является возможность последовательного применения всех источников в едином вакуумном цикле, что исключает загрязнение поверхности и снимает необходимость повторной юстировки между операциями.

2.2.2. Ионные источники

В установке применяются три технологических источника ускоренных ионов (рисунок 2.19), основные технические характеристики которых представлены в таблице 2.3.

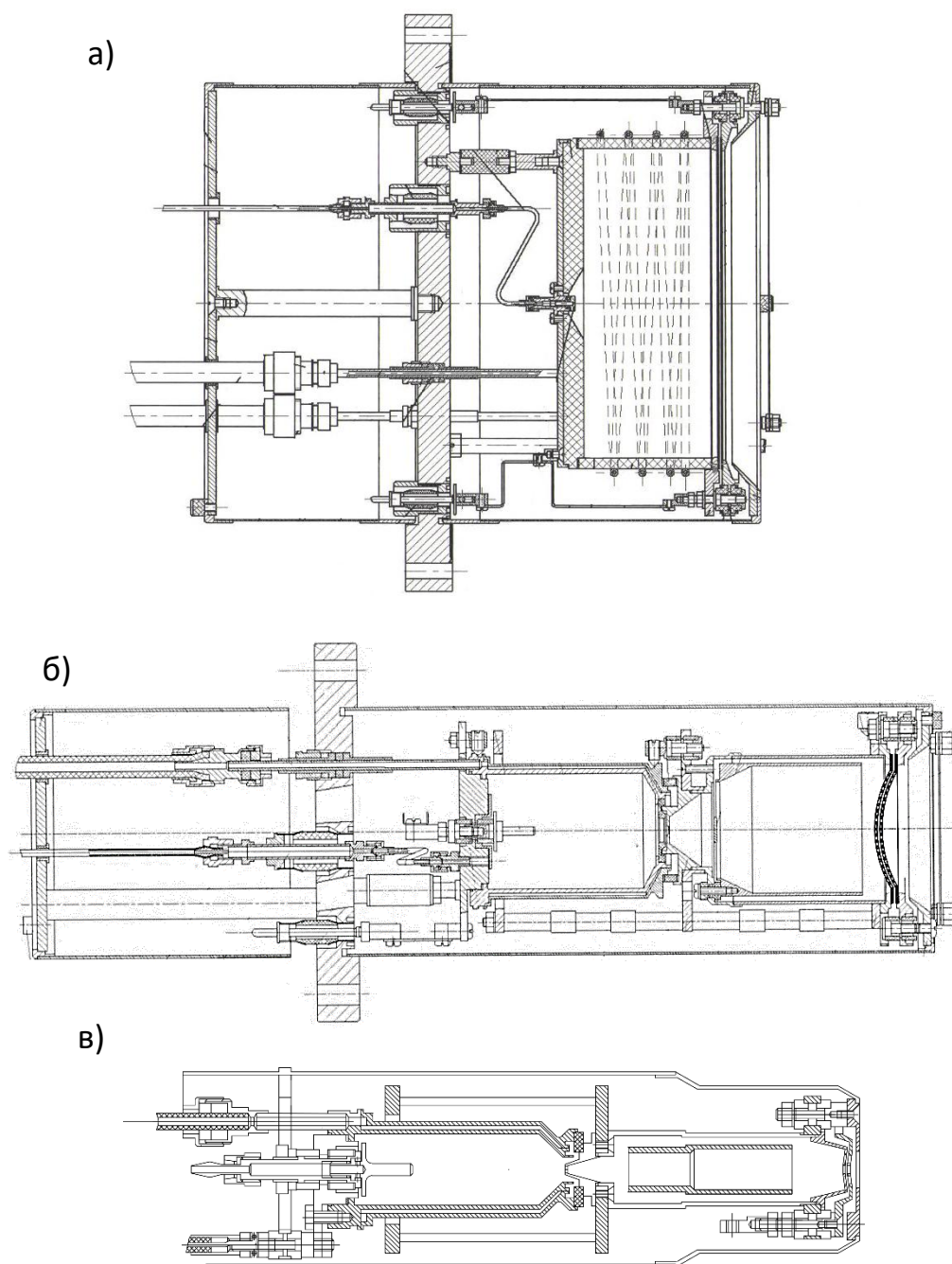


Рисунок 2.19. Схемы источников ионов для установки ионно-пучкового травления: а. Источник КЛАН-163М – ВЧ источник с плоской ИОС; б. Источник КЛАН-53М – источник с холодным катодом и фокусирующей ИОС; в. Источник КЛАН-12М – источник с холодным катодом и фокусирующей ИОС.

Таблица 2.3. Основные характеристики ионных источников

Характеристика	КЛАН-163М	КЛАН-53М	КЛАН-12М
Тип источника	Радиочастотный $f=2.0$ МГц	Сеточный, с холодным полым катодом	Сеточный, с холодным полым катодом
Ионно-оптическая система	двухсеточная плоская	двухсеточная, вогнутая ($R=70$ мм)	двухсеточная, вогнутая ($R=20$ мм)
Рабочий газ	инертные, O_2 , N_2 , C_2H_8 и др.	инертные, N_2	инертные, N_2
Рабочее давление, Торр	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Размер ионного пучка, мм	$\varnothing 160$	$\varnothing 10$	$\varnothing 2$
Максимальный ионный ток, мА	200	80	1
Энергия ионов, эВ	300-1500	300-1500	300-1500
Разброс по энергии, эВ	± 3	± 3	± 3

Как можно видеть из рисунка 2.19б, рисунка 2.19в и Таблицы 2.3 ионно-оптические системы источников КЛАН-12М и КЛАН-53М представляют собой конструкцию, состоящую из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны $R=20$ мм и $R=70$ мм соответственно. Данное решение было реализовано совместно с НТК “Платар”.

Модернизация источников с фокусировкой ионного пучка

В прототипе – установке, описанной в [69], для процедуры коррекции формы применялся ионный источник АКТАН с холодным катодом и фокусировкой ионного пучка за счет ионно-оптической системы, состоящей из двух сколлимированных вогнутых сферических сеток [101]. Данная ИОС обеспечивала сжатие ионного пучка до $\varnothing 20$ мм на полувысоте на расстоянии 70 мм от выходной апертуры. Таким образом, источник позволял получить максимальную плотность тока на уровне 4.5 мА/см^2 , при токе ионов $I_{\text{ион}}=20$ мА. Размер ионного пучка на поверхности обрабатываемой детали задавался за счет сменных водоохлаждаемых диафрагм и изменялся в пределах $\varnothing 1-15$ мм. Такое решение, во-первых, приводило к квадратичному падению ионного тока при уменьшении

диаметра диафрагмы, и соответствующему увеличению времени обработки, что особенно критично для габаритных деталей, а, во-вторых, происходило распыление краёв диафрагмы, продукты эрозии, которой загрязняют поверхность обрабатываемой детали. Кроме того, из-за распыления диафрагмы сокращалось время непрерывной работы источника из-за необходимости его регулярной чистки.

Для повышения эффективности обработки в рамках диссертационной работы было проведено развитие концепции установки [69] за счет замены пары источников. Вместо источников АКТАН и КЛАН-103М [101] были применены источники с фокусировкой ионного пучка КЛАН-12М и КЛАН-53М, модификация ИОС которых была проделана в рамках диссертационной работы.

На базе технологического источника КЛАН-10М [102] совместно с НТК “Платар” был разработан источник с фокусировкой ионного пучка КЛАН-12М. Была поставлена задача получить минимально возможный диаметр ионного пучка без использования обрезających диафрагм. Был проведен расчет электрических полей с учетом геометрии электродов ИОС при неизменных параметрах разрядной камеры [103]. В результате была получена ионно-оптическая система, состоящая из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны 20 мм. Схема ИОС представлена на рисунке 2.20.

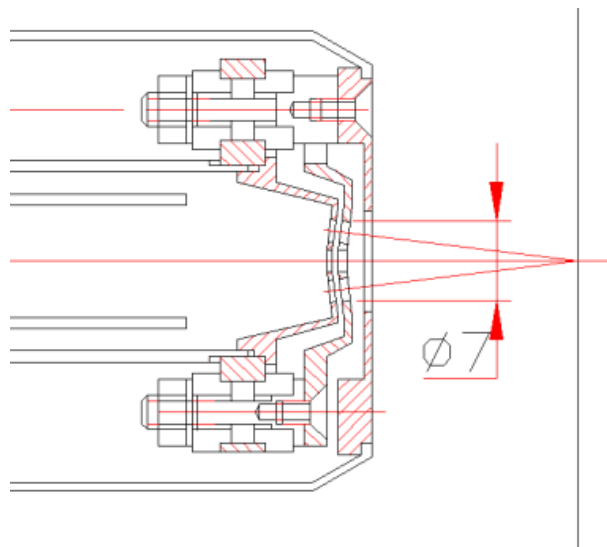


Рисунок 2.20. Чертеж фокусирующей ионно-оптической системы в КЛАН-12М.

Как можно видеть, источник был оснащен трехэлектродной фокусирующей ИОС, которая позволяет собрать пучок ионов на расстоянии, определяющемся радиусом кривизны электродов.

По примеру модернизации источника КЛАН-10М была проведена модификация ионно-оптической системы источника КЛАН-53М [104] изначально оснащенного плоской ИОС, обеспечивающей квазипараллельный ионный пучок. В данном случае плоская ионно-оптическая система также была заменена на фокусирующую, состоящую из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны 70 мм (рисунок 196).

Таким образом, проведена модификация источников ускоренных ионов, плоская ИОС заменена на вогнутую фокусирующую. Важной особенностью новых источников является отсутствие обрезавшей ионный пучок диафрагмы, что позволило существенно повысить эффективность обработки за счет использования полного тока ионного пучка, а также обеспечило устранение пагубного эффекта загрязнения поверхности обрабатываемой детали продуктами эрозии края диафрагмы, что также повысило время непрерывной работы источника. Фокусное расстояние (область перетяжки) соответствующее минимальному размеру ионного пучка находится на близком к значениям радиусов кривизны расстояниях (исследование размера ионного пучка в области перетяжки представлено в Глава 2 п.2.3). Как сказано выше при проведении процедуры коррекции локальных ошибок формы сканирование производится при поддержании заданного расстояния источник – образец. Это означает, что источник в процессе работы должен находиться на расстоянии 20 мм (для КЛАН-12М) или 70 мм (для КЛАН-53М) от поверхности детали. Для возможности поворота столика с закрепленной на его поверхности деталью от направления одного источника в направлении другого для источников КЛАН-12М и КЛАН-53М реализовано два положения: парковочное, положение в котором источник находится в нерабочем состоянии (расстояние до центра гониометра 200 мм), и рабочее, когда источник подводится к центру гониометра.

2.2.3. Исследование функции удаления материала ионными источниками

Для проведения контролируемого формообразования ионно-пучковыми методами необходимо знать распределение скорости ионного травления в плоскости обрабатываемого образца. Распределение скорости ионного травления может быть измерено несколькими способами:

- 1) Анализ кратера, формирующегося в ходе ионного травления на подложке за некоторое время T . Кратер травления может быть измерен интерферометрически, подробнее см. Глава 2, п.2.3.

- 2) Измерение распределения плотности ионного тока в плоскости обрабатываемого образца и пересчёт её в распределение скорости ионного травления, в предположении что известен коэффициент распыления Y (см. формулу 1.4), определяемый как соотношение количества атомов, покинувших мишень к количеству упавших ионов. Глава 2, п.2.4.

Широкоапертурный источник (КЛАН-163М)

Сильноточный широкоапертурный источник ускоренных ионов КЛАН-163М с квазипараллельным ионным пучком (обеспечивается геометрией ИОС – плоская двухсеточная) используется для проведения процедур ионной асферизации и полировки. Основные параметры источника приведены в таблице 2.3. Благодаря большой выходной апертуре пучка ($\varnothing 160$ мм) ток ионного пучка может превышать 200 мА, что позволяет проводить удаление большого объёма материала на всей апертуре ионного источника. Возможность работы с активными газами, в частности с кислородом позволяет применять источник для химической очистки поверхности оптической детали от органических загрязнений.

При исследовании ионного пучка, формируемого источником КЛАН-163М, применялся второй метод (Измерение распределения плотности ионного тока, см. п.2.3). Экспериментальное исследование пространственного распределения ионного тока, формируемого источником КЛАН-163М, проводилось в рабочей плоскости, расположенной на расстоянии 270 мм от выходной сетки источника, что соответствует центру системы позиционирования. Для регистрации ионного тока применялся детектор – цилиндр Фарадея с входной апертурой диаметром 1 мм, закреплённый на столике для образцов на расстоянии 80 мм от оси вращения. Запись пространственного распределения ионного тока осуществлялась в процессе сканирования детектором по апертуре ионного источника. Таким методом были исследованы распределения плотности ионного тока для различных значений ускоряющего напряжения. На рисунке 2.21 представлена полученная карта распределения плотности ионного тока при параметрах процесса $I_{\text{ион}} = 200$ мА, $U_{\text{ион}} = 800$ В.

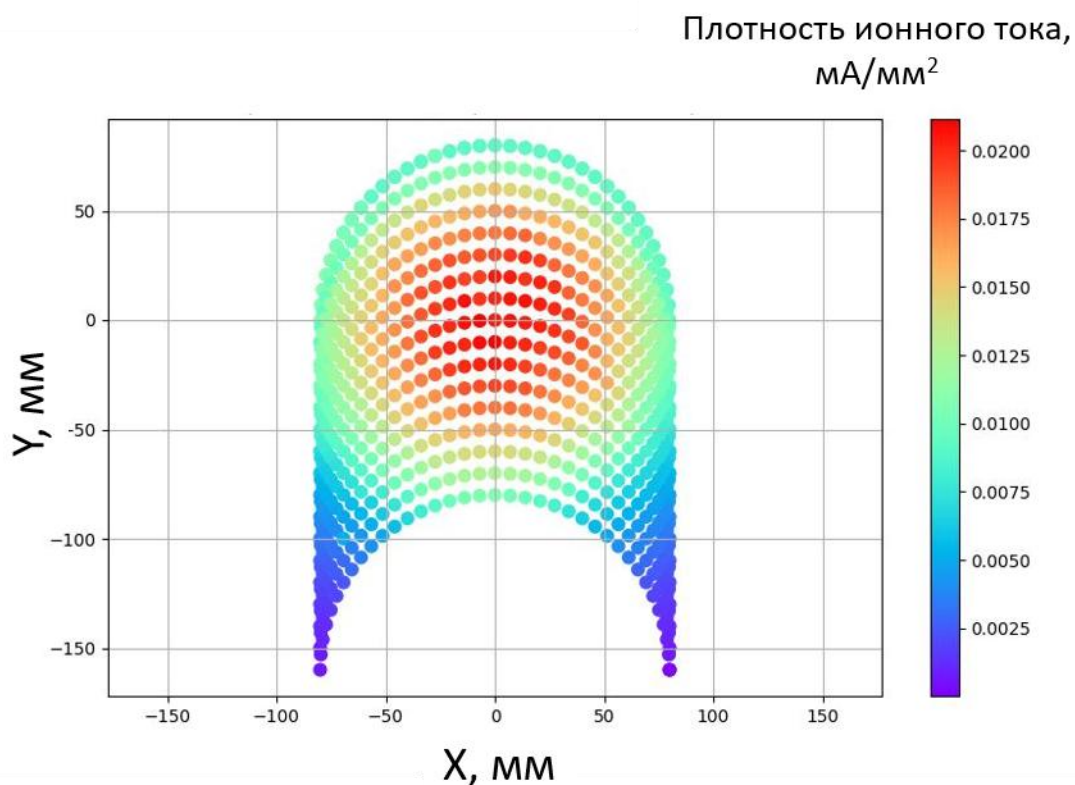


Рисунок 2.21 Измеренное распределение плотности ионного тока источника КЛАН-163М, $I_{\text{ион}} = 200$ мА, $U_{\text{ион}} = 800$ В.

На рисунке 2.22 представлены радиальные нормированные зависимости плотности ионного тока для различных ускоряющих напряжений.

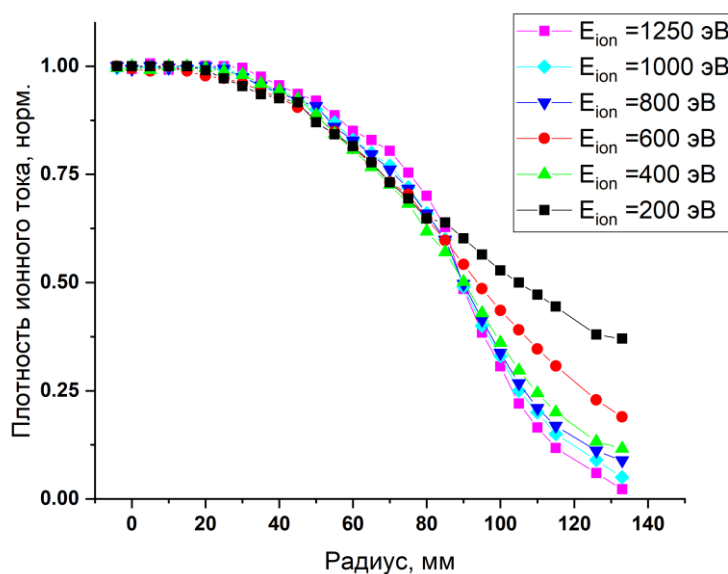


Рисунок 2.22. Распределение плотности ионного вдоль радиуса источника КЛАН-163М (Расстояние 270 мм; газ Ar; $I_{\text{ион}} = 200$ мА).

Как видно из рисунка полный размер пучка на полувысоте составляет около 160 мм. Таким образом, и система позиционирования (диапазон перемещений вдоль оси Z), и размер ионного пучка (ширина на полувысоте FWHM – 160 мм) позволяют, при использовании соответствующих фигурных диафрагм на выходе источника, обрабатывать детали с диаметром до 320 мм. Кроме того, обнаружена возможность работы с ускоряющим напряжением $U_{\text{уск}}=200$ В, что обеспечивает проведение процедуры чистки поверхности детали ионами кислорода без распыления материала детали.

Определим распределение скорости ионного травления в области образца исходя из коэффициента распыления. В пункте 2.1.1 было показано, что для ионов аргона с энергией 1000 эВ коэффициент распыления монокристаллического кремния <110> составляет $Y = 1.6$ атом/ион. Таким образом, распределение скорости ионного травления для данной энергии представлено на рисунке 2.23

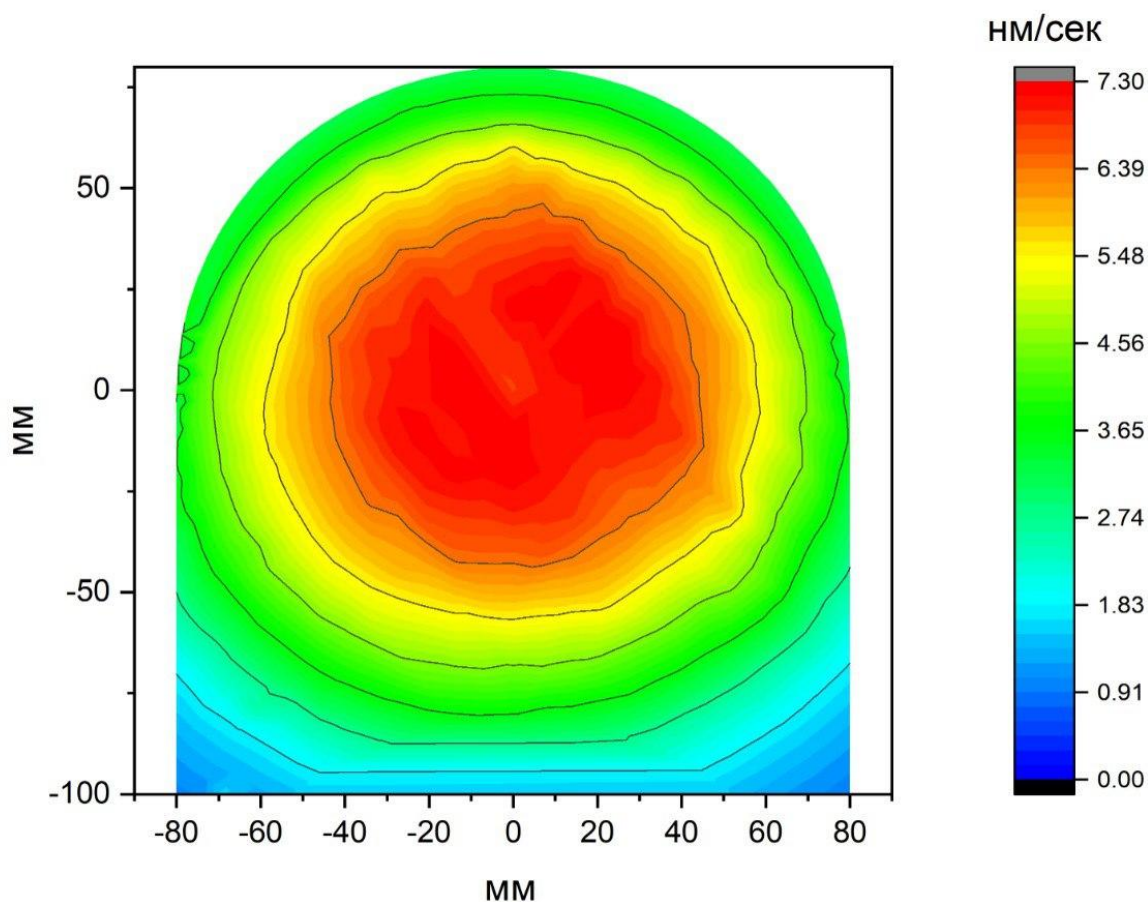


Рисунок 2.23. Распределение скорости ионного травления плавленого кварца источником КЛАН-163М ионами Ar^+ , параметры процесса: $I_{\text{ион}} = 200$ мА, $U_{\text{ион}} = 1000$ В.

Таким образом, используя данное распределение ионного тока может быть рассчитана обрезающая ионный пучок диафрагма (методика расчета приведена в Главе 3) для проведения полировки или асферизации поверхности подложек зеркал.

Малоразмерный источник с фокусирующей ИОС (КЛАН-12М)

Для ионного источника КЛАН-12М исследовались размер и форма ионного пучка в зависимости от расстояния от края ионного источника.

Для определения параметров ионного пучка была проведена серия экспериментов по формированию кратеров при различных расстояниях до ионного источника. В качестве рабочей была выбрана энергия ионов $E_{\text{ион}}=1250$ эВ, поскольку в работе [72] было показано что при обработке плавленого кварца ионами аргона с данной энергией шероховатость поверхности ухудшается. Во всех экспериментах для нейтрализации заряда ионного пучка использовался установленный на выходе ионного источника накальный нейтрализатор.

Для изучения размера ионного пучка на заранее измеренной на лазерном интерферометре Zygo VeriFire 4 плоской пластинке из плавленого кварца формировался кратер травления. Для этого образец подводился к источнику на заданное расстояние, открывалась заслонка и проводилось травление при неподвижных источнике и образце в течении некоторого времени T . Анализируя полученный кратер, можно вычислить латеральный размер ионного пучка и построить пространственное распределение скорости травления (восстановить функцию удаления материала – BRF). Для изучения полного тока ионов перед ионным источником устанавливается цилиндр Фарадея с большой входной апертурой (большей размера ионного пучка), перекрывающий собой весь ионный пучок.

На рисунке 2.24б представлена карта поверхности образца после ионного облучения, на ней отчетливо виден кратер травления. Однако, представленная карта не является информативной, так как содержит большой вклад исходной формы поверхности. Для выделения кратера травления сравним поточечно карты поверхности, измеренные до и после процесса. Разность этих карт представлена на рисунке 2.24в. Полученная карта разности описывает пространственное распределение удалённого с поверхности материала. На рисунке 2.24г показаны сечения разностной карты по вертикали и горизонтали, а также приводятся аппроксимация полученных сечений распределением

Гаусса. Кратеры являются гауссоподобными, и могут быть охарактеризованы при помощи ширины на полувывсоте.

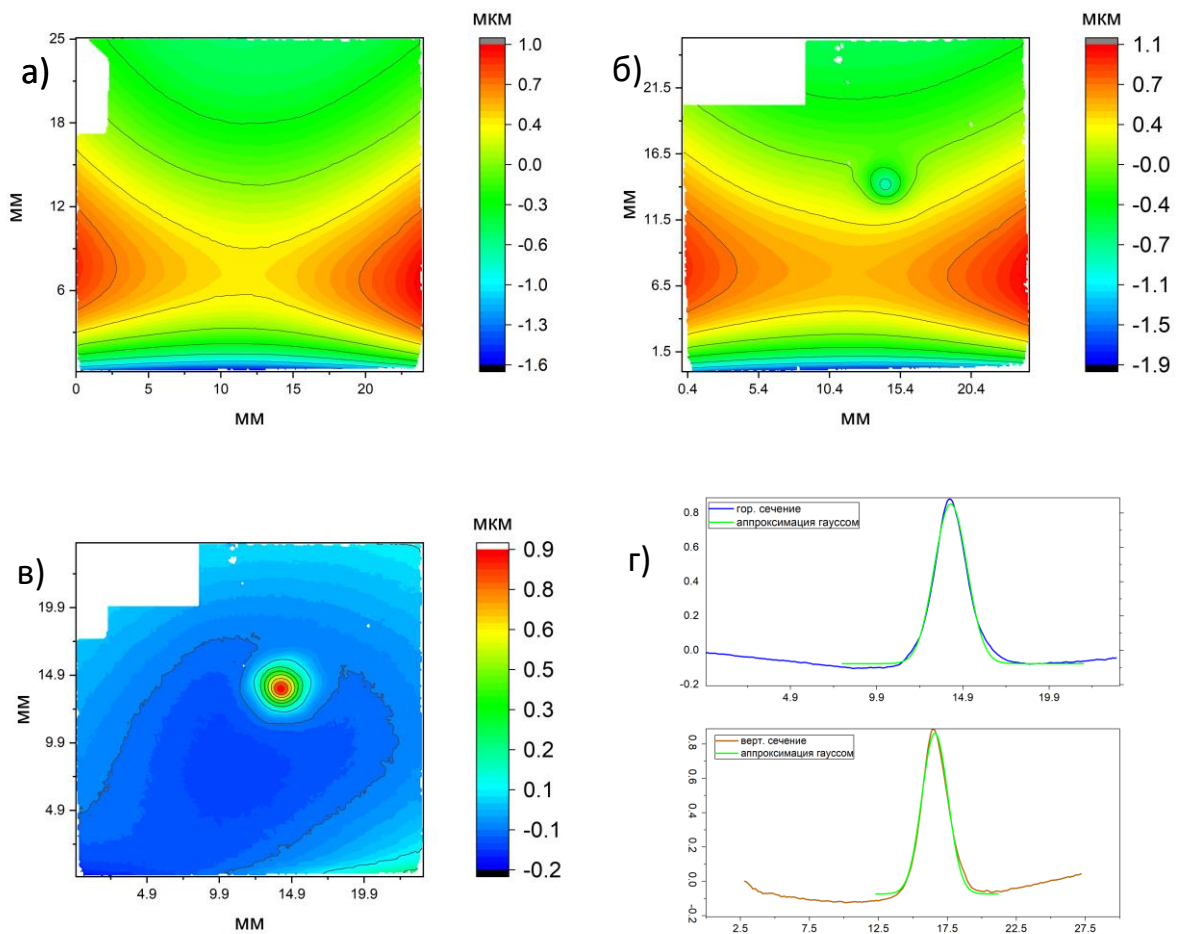


Рисунок 2.24. Исследование кратера травления. а) исходная поверхность; б) поверхность с кратером; в) кратер; г) сечения кратера.

На рисунке 2.25 представлена построенная по исследованиям кратеров зависимость ширины ионных пучков от расстояния между ионным источником и образцом.

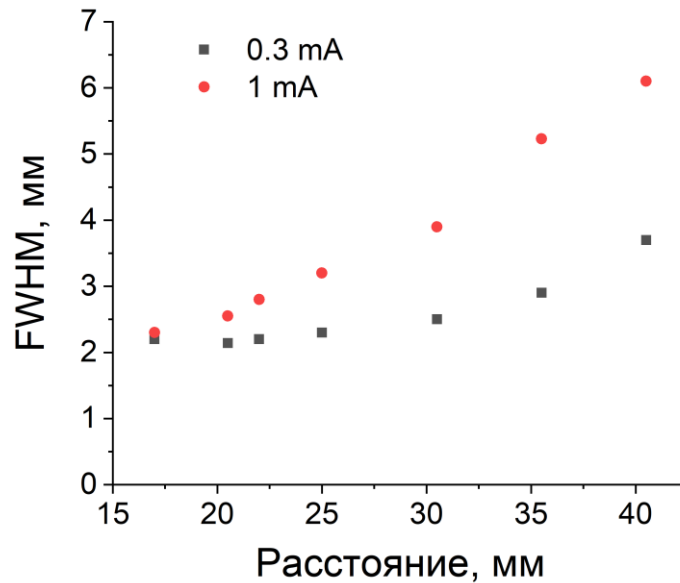


Рисунок 2.25. Зависимость полуширина кратера травления от расстояния “источник-образец”. Источник КЛАН-12М ($E_{\text{ион}}=1250$ эВ, $I_{\text{ион}}=0.3$ мА и $I_{\text{ион}}=1$ мА)

Можно видеть, что минимальный размер ионного пучка составил 2.1 мм, что согласно исследованию, проведенному в [88] позволяет эффективно снижать ошибки формы поверхности с пространственными частотами до $9.5 \cdot 10^{-4}$ мкм $^{-1}$. Кроме того, обнаружено, что с увеличением расстояния латеральный размер кратера увеличивается. Аналогичная зависимость, только с большими размерами кратеров, наблюдается для тока ионов 1 мА. Такое поведение размера пучка может быть использовано для его плавного уменьшения в процессе итерационной коррекции формы поверхности при уменьшении латеральных размеров ошибок формы и их абсолютной высоты.

В ходе исследования было обнаружено, что при нахождении ионного источника ближе 17 мм от тестового образца пучок не описывается нормальным распределением (рис унок 2.26). Такое изменение связано с тем, что расстояние до образца было меньше фокусного, из-за чего на пространственном распределении видны вклады от отдельных элементов пучка. Ориентация отдельных пятен, видимых на распределении, совпадает с ориентацией ячеек на сетке ИОС ионного источника.

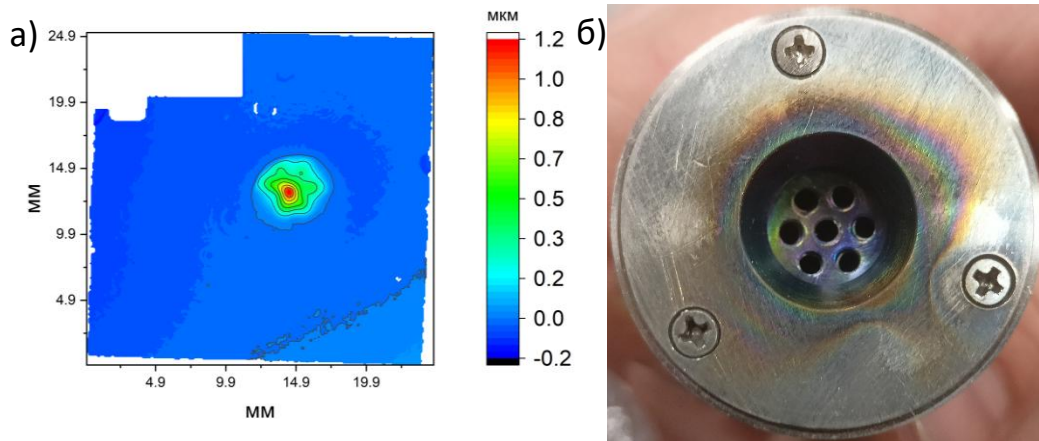


Рисунок 2.26. Кратер травления на расстоянии 10 мм от источника (а) и фотография ускоряющей сетки ИОС (б).

Таким образом, проведено исследование характеристик ионного пучка источника КЛАН-12М. В частности, получены зависимости размера ионного пучка от расстояния от выходной апертуры и показана перспективность применения источника для коррекции локальных ошибок формы поверхности, в том числе при итерационном уменьшении размера пучка. Минимальный размер ионного пучка – 2.1 мм, что позволяет эффективно снижать ошибки формы поверхности с пространственными частотами до $9.5 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$.

Источник с фокусирующей ИОС (КЛАН-53М)

Аналогичные исследования были проведены для источника КЛАН-53М. Кратеры, зарегистрированные при различных расстояниях от ионного источника показаны на рисунок 2.27. На образце сформирована серия кратеров (ток ионов 10, 20 и 40 мА, энергия ионов 1250 эВ) размер которых был проанализирован и представлен в виде графика (рисунок 2.28). Во всех экспериментах для нейтрализации заряда ионного пучка использовался установленный на выходе ионного источника накальный нейтрализатор.

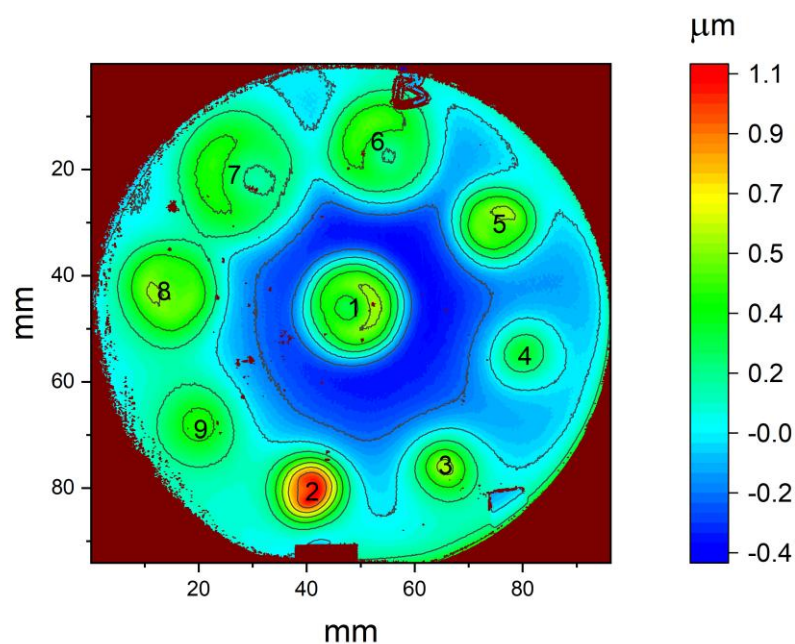


Рисунок 2.27. Кратеры травления для источника КЛАН-53М ($I_{\text{ион}}=20$ мА, $E_{\text{ион}}=1250$ эВ).

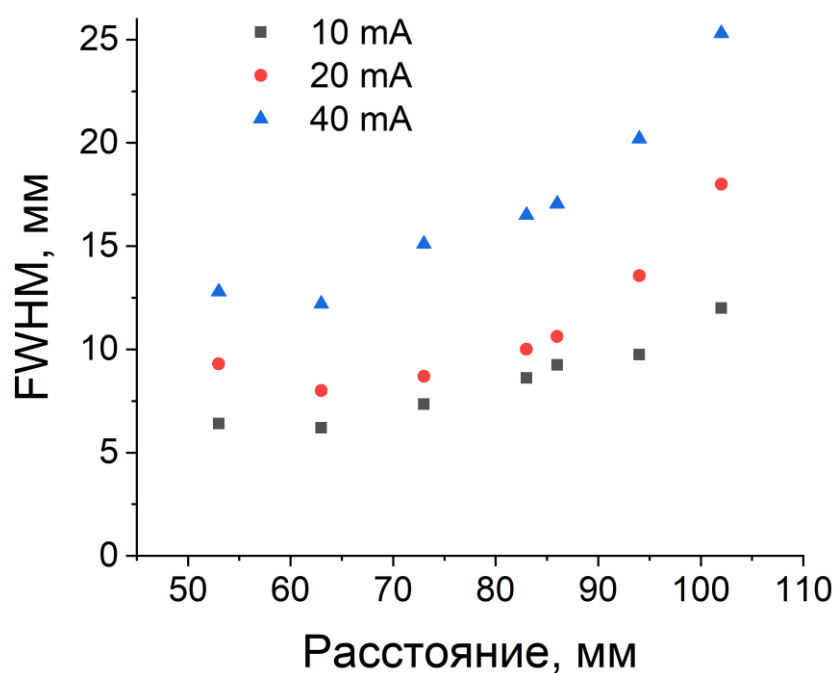


Рисунок 2.28. Зависимость ширины кратера травления на полувысоте от расстояния “источник-образец”. Источник КЛАН-53М ($E_{\text{ион}}=1250$ эВ, $I_{\text{ион}}=10$ мА; $I_{\text{ион}}=20$ мА и $I_{\text{ион}}=30$ мА).

Как можно видеть, минимальный размер ионного пучка при $E_{\text{ион}}=1250$ эВ и $I_{\text{ион}}=10$ мА составил 6.2 мм, что перекрывается с максимальным зарегистрированным размером

пучка для источника КЛАН-12М. Такая непрерывная зависимость позволит проводить коррекцию поверхностей любой формы и габаритов с латеральными размерами неоднородностей до $9.5 \cdot 10^{-4}$ мкм⁻¹.

Зарегистрированные распределения ионного тока в пучке для обоих источников используются для расчетов карты травления при проведении процедуры коррекции локальных ошибок формы (см. Главу 4).

Заключение по 2 главе.

В результате проведенных исследований были определены оптимальные режимы ионно-пучковой обработки кристаллического сапфира и кварца. Для монокристаллического кремния показана применимость методики IBF при энергии ионов выше пороговой, обеспечивающей заметную скорость удаления материала и шероховатость $\sigma_{\text{eff}} < 0.3$ нм. Для сапфира установлено, что травление ионами аргона с энергией 700 эВ обеспечивает сглаживание шероховатости до уровня $\sigma_{\text{eff}} < 0.3$ нм. Для плавленого кварца подтверждена эффективность использования аргона в диапазоне энергий 500–1250 эВ, обеспечивающая получение шероховатости $\sigma_{\text{eff}} \sim 0.25$ нм. Полученные зависимости позволяют изготавливать из этих материалов оптические элементы с качеством поверхности, удовлетворяющим требованиям рентгенооптики. Основываясь на полученные данные в рамках диссертационной работы была разработана и построена установка ионно-пучковой обработки, предназначенная для создания высокоточных оптических деталей диаметром до 320 мм. Установка включает в себя вакуумную камеру с двухступенчатой системой откачки (форвакуумный и турбомолекулярный насосы), пятикоординатную систему позиционирования детали и три специализированных ионных источника. Ключевой особенностью установки является комбинированная технология обработки: широкоапертурный сильноточный источник с квазипараллельным пучком через профилирующую диафрагму обеспечивает полировку и асферизацию поверхностей, а два фокусирующих источника позволяют выполнять прецизионную коррекцию локальных дефектов формы по безмасочной технологии. Для обработки диэлектрических материалов каждый ионный источник оснащен термокатодом-нейтрализатором, полностью компенсирующим заряд пучка. Установка ионно-пучкового травления реализует полный цикл обработки - от первоначального асферического формообразования до финишной коррекции.

Автоматизированная система управления на базе персонального компьютера обеспечивает координацию всех технологических процессов: управления вакуумной системой, параметрами ионных источников и точным позиционированием образца. Конструкция установки позволяет решать широкий спектр задач формирования высокоточных оптических элементов, сочетая высокую производительность с возможностью нанометровой точности коррекции поверхности.

Кроме того, проведены модификации источников ускоренных ионов КЛАН-12М и КЛАН-53М и тестирование характеристик всех примененных источников ускоренных ионов. Для широкоапертурного источника КЛАН-163М зарегистрированы распределения ионного тока при различных ускоряющих напряжениях. Распределение ионного тока вдоль апертуры необходимо для расчета сечения обрезающих диафрагм, используемых для проведения процедур осесимметричной коррекции формы, асферизации, ионной полировки и предоперационной чистки поверхности. Для источников с фокусировкой ионного пучка (КЛАН-53М и КЛАН-12М) зафиксированы размер и форма кратера травления для различных токов ионов и расстояния от выходной апертуры. Форма кратера необходима для расчета карты травления для процедуры коррекции локальных ошибок формы. Для источника КЛАН-12М пучок ионов изменяется в диапазоне 2.1-6 мм, ток ионов достигает 1 мА, а для источника КЛАН-53М пучок ионов изменяется в диапазоне 6.2-25 мм, ток ионов – до 40 мА. Таким образом, применение двух источников с фокусировкой ионного пучка расширяет функционал возможностей обработки неоднородностей по высоте и латеральным размерам. Т.е. непрерывный диапазон изменения диаметра перетяжки ионного пучка от минимального – 2.1 мм до порядка 25 мм и изменение тока ионов от 0.3 до 40 мА позволяет проводить коррекцию поверхностей любой формы и габаритов как с малым, так и значительным удалением материала, и латеральными размерами неоднородностей от десятков миллиметров до сотых долей мкм (диапазон пространственных частот до $9.5 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}^{-1}$).

Глава 3. Методы ионно-пучковой обработки широкоапертурным ионным источником

Широкоапертурный сильноточный источник ускоренных ионов является эффективным инструментом для обработки оптических поверхностей, сочетающим высокую производительность с контролируемым удалением материала на большой площади. Формируемый рельеф поверхности определяется траекторией движения заготовки и пространственным распределением скорости травления, которое задается с помощью фигурной диафрагмы, профилирующей ионный пучок.

В процессе обработки, как правило, используется одномерное перемещение заготовки относительно профилированного пучка. Такая схема позволяет выполнять ионную полировку, асферизацию и коррекцию формы поверхности. Несмотря на доказанную эффективность метода, продемонстрировано его дальнейшее развитие, в том числе предложены оптимизация геометрии диафрагм и изменения траектории движения заготовки.

3.1. Осесимметричная обработка

Первые упоминания об использовании диафрагмы при ионно-пучковой обработке относятся к 80м годам прошлого века. Например, в работе [76] показывалась возможность осесимметричной асферизации. Осесимметричная асферизация оптической поверхности позволяет, например, увеличить поле зрения проекционной схемы за счёт компенсации сферических aberrаций для внеосевых лучей. В целом осесимметричная обработка применяется в широком спектре задач, где требуется удаление материала по всей поверхности обрабатываемого образца с определённой зависимостью глубины травления (H) от радиуса детали (т.е. $H=H(r)$), в том числе $H(r) = \text{const}$, что может быть использовано, например, при ионной полировке. По данной методике ($H(r) = \text{const}$) на поверхности может быть сформирован рисунок маски (ионная литография). В данном случае, маска может быть нанесена непосредственно на поверхность литографически, либо установлена перед образцом на некотором расстоянии, в этих случаях края рисунка будут либо резкие, либо размытые.

Процедура осесимметричной обработки поверхности производится по схеме, представленной на рисунке 3.1. Применение для этой задачи широкоапертурного

сильноточного источника с квазипараллельным ионным пучком позволяет обрабатывать подложки, диаметр которых в два раза превышает размер ионного источника со значительным удалением материала подложки (единицы - десятки мкм). Например, в работе [105] была проведена асферизация оптической линзы с удалением материала в максимуме 34 мкм.

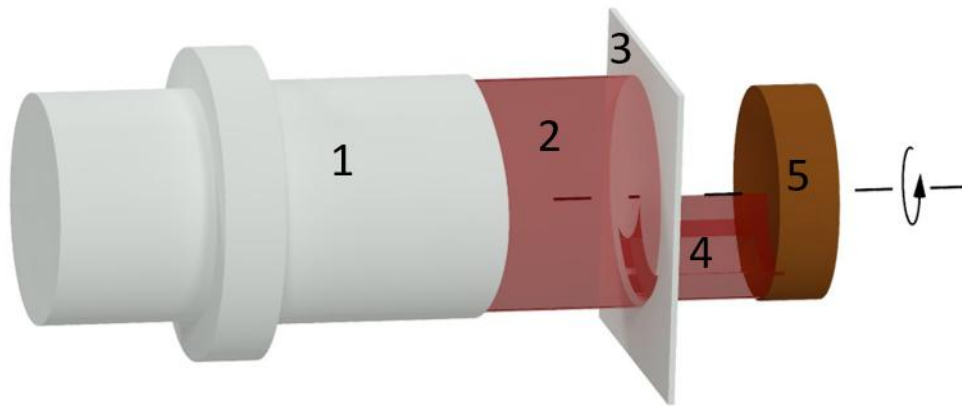


Рисунок 3.1. Схема осесимметричной обработки поверхности. 1. Широкоапертурный источник ионов; 2. Квазипараллельный ионный пучок; 3. Формирующая диафрагма; 4. Профилированный ионный пучок после диафрагмы; 5. Образец; 6. Пятиосная система позиционирования.

Как можно видеть из рисунка методика заключается в формировании осесимметричного профиля на поверхности вращающейся вокруг своей оси обрабатываемой детали при воздействии ионного пучка, сечение которого задано формирующей диафрагмой. В процессе обработки заготовка вращается позади диафрагмы, перекрывающей часть ионного пучка, за счет чего удастся получить требуемое осесимметричное распределение глубины травления на поверхности заготовки – профиль травления $H(r)$. Профиль травления может быть выражен следующим образом (3.1):

$$H(r) = \frac{N}{2\pi r \omega} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{etching}(r, \varphi) r d\varphi \quad (3.1)$$

$H(r)$ – радиальное распределение глубины ионного травления, $v_{etching}(r, \varphi)$ – распределение скорости ионного травления, $2\pi r$ – полная длина дуги, $\alpha(r)$ и $\beta(r)$ – углы, ограничивающие длину дуги открытой части диафрагмы на радиусе r , $N=const$ – число оборотов детали, необходимое для достижения требуемого $H(r)$ (одинаково для всех r), ω – постоянная

угловая скорость вращения. Функции $\alpha(r)$ и $\beta(r)$ задают форму диафрагмы в полярных координатах. На рисунке 3.2 приводится схематичное изображение симметричной ($\alpha(r)=-\beta(r)$) формирующей ионный пучок диафрагмы.

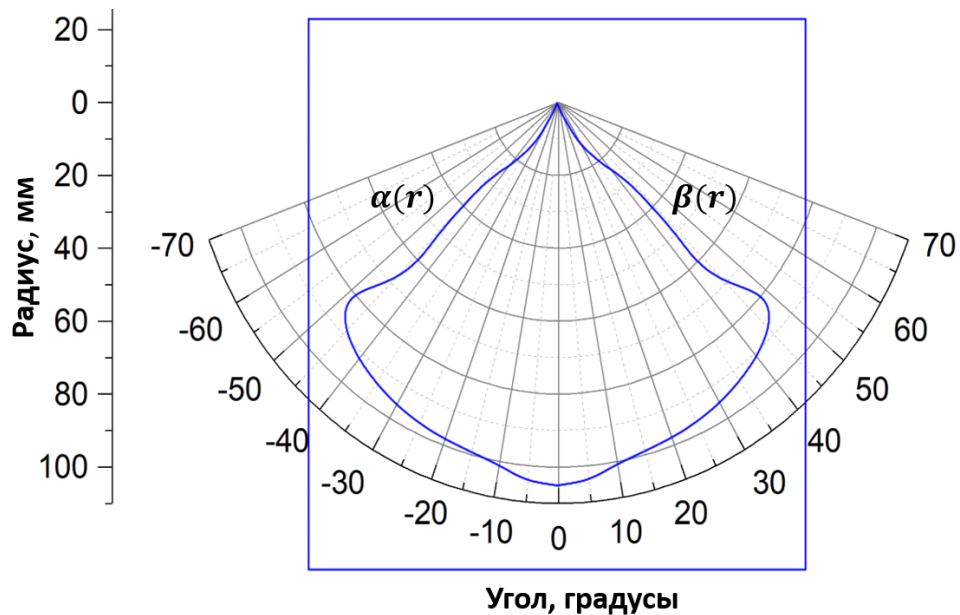


Рисунок 3.2 Схематичное представление обрезающий ионный пучок диафрагмы.

Введение обрезающей ионный пучок диафрагмы приводит к тому, что закрытые области ионного пучка не достигают обрабатываемой детали, за счёт чего можно регулировать глубину травления для каждого радиуса независимо. Таким образом, расчёт диафрагмы сводится к нахождению пределов интегрирования α и β , при которых значение интеграла совпадёт с требуемой для данного радиуса глубиной травления. Благодаря такому подходу можно вычислить форму диафрагмы для любого заранее заданного профиля травления.

Итерационное изменение формы обрезающей ионный пучок диафрагмы

Важным преимуществом ионной асферизации над механической является возможность контроля формирующегося профиля $H=H(r)$. Для контроля профиля $H(r)$ используется контрольная заготовка ("кукла") с маской из фоторезиста (Рисунок 3.3а), наносимой вдоль радиуса на лабораторном литографе [106]. В результате травления на границе маски формируется ступенька, измеряя высоту которой с помощью интерферометра белого света (WLI), удастся сравнить экспериментальный профиль с расчетным (Рисунок 3.3б). Коррекция диафрагмы проводится итеративно: при

недостаточной глубине травления на данном радиусе длина открытой дуги увеличивается, при избыточной – уменьшается. Точность метода достигает 1% от глубины травления [107]

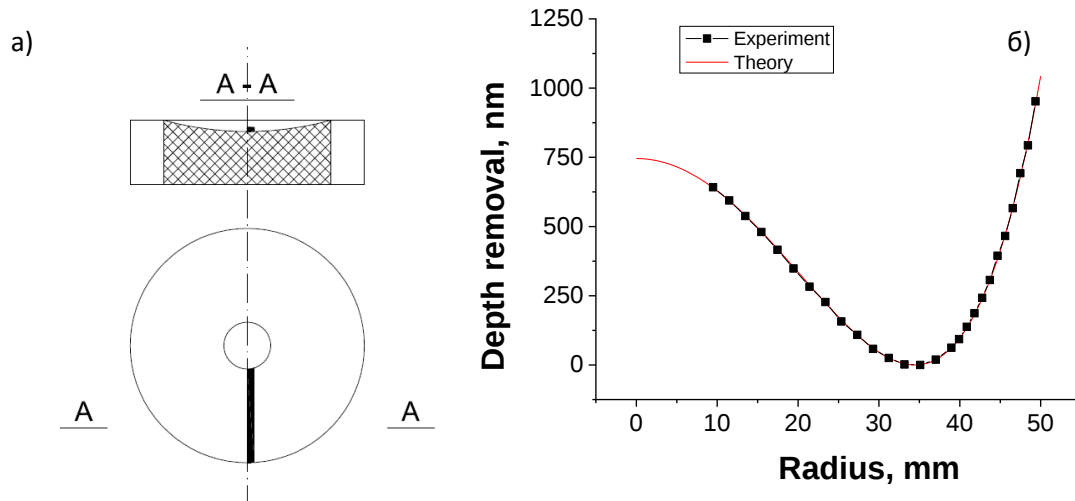


Рисунок 3.3. а) “Кукла” с нанесенной маской для контроля профиля травления;
б) Сравнение профиля травления (теория и эксперимент).

С помощью осесимметричной обработки широкоапертурным сильноточным ионным источником через формирующую диафрагму проведена асферизация ряда рентгенооптических элементов [108,109].

Осесимметричная ионно-пучковая обработка – эффективный метод формирования поверхностей со сложным законом зависимости формы поверхности от радиуса, позволяющая проводить травление на значительные глубины, обеспечивая при этом шероховатость на атомарно гладком уровне. Однако, стоит отметить, что в геометрии осесимметричной обработки существует особая точка, в которой ось вращения обрабатываемой детали совпадает с вершиной обрезающей ионный пучок диафрагмы, наличие которой оказывается критическим в случае отсутствия у детали центрального отверстия [109].

3.1.1. Особенности ионного травления вблизи оси вращения

Рассмотрим проблему существования особой точки, в которой ось вращения обрабатываемой детали совпадает с вершиной обрезающей ионный пучок диафрагмы. Для иллюстрации сложности настройки диафрагмы вблизи центра вращения рассмотрим

задачу о равномерном травлении (полировке), то есть распределение глубины травления по радиусу является константой ($H(r) = \text{const}$). Для ионного источника КЛАН-163М экспериментально было получено распределение скорости травления в плоскости обрабатываемой заготовки (Глава 2.3.1 рисунок 2.23). На основе данного распределения была рассчитана диафрагма, обеспечивающая равномерное удаление материала с поверхности обрабатываемой детали. Диафрагма была изготовлена на электроэрозионном станке АРТА-153 из листовой нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. На рисунке 3.4 представлена фотография изготовленной диафрагмы.

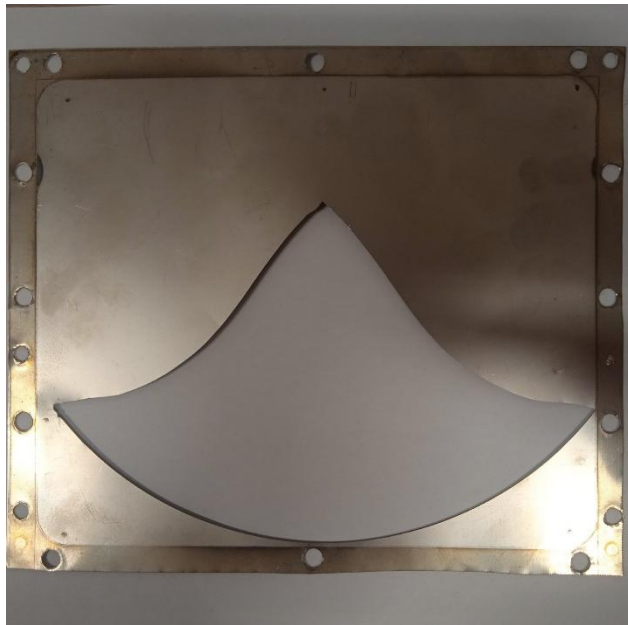


Рисунок 3.4. - Фигурная диафрагма для формирования равномерного профиля травления.

После изготовления диафрагмы была произведена её экспериментальная проверка по методике, описанной выше. В качестве тестового объекта применялась кремниевая пластина, на которой литографически (с помощью УФ-литографа [106]) была сформирована маскирующая полоска из резиста с резким краем (рисунок 3.5).

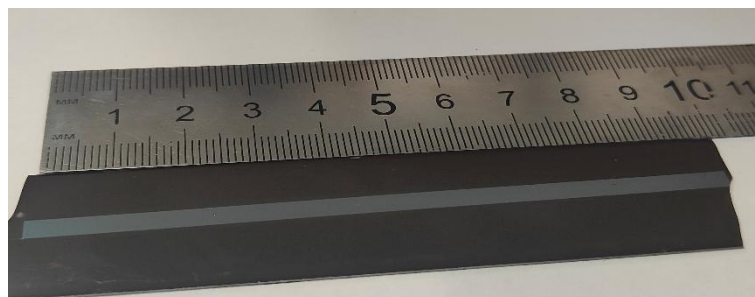


Рисунок 3.5 Фотография кремниевой пластины с нанесённой маской.

На рисунке 3.6 представлено изменение распределения глубины травления по радиусу при итерационном изменении формы диафрагмы. Наибольшая изначальная ошибка наблюдается в области, лежащей вблизи оси вращения (пунктирная линия). Кроме того, можно видеть, что устранение данной ошибки потребовало наибольшего количества корректировок диафрагмы.

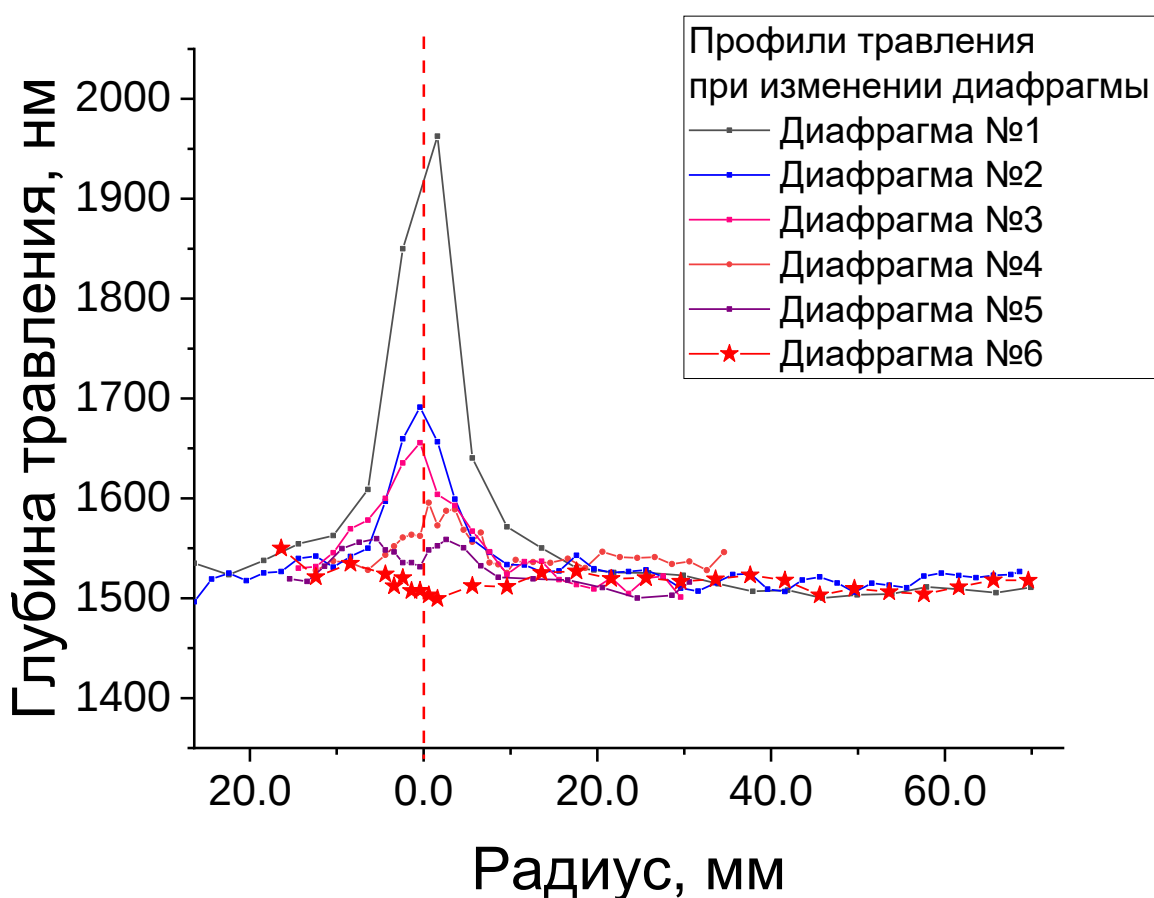


Рисунок 3.6. Изменение распределения глубины травления по радиусу при итерационном изменении формы диафрагмы. Кривые соответствуют различным итерациям формирующей диафрагмы. Красным пунктиром отмечено положение оси вращения.

Аналогичная проблема была освещена в работе [110]. Автор статьи предлагает решение, заключающееся в отдалении диафрагмы от обрабатываемой детали и переносе ее ближе к ионному источнику. В этом случае происходит размытие формирующегося профиля вследствие расходимости ионного пучка, за счёт чего удаётся уменьшить влияние на

результатирующий профиль неточности настройки диафрагмы относительно оси вращения. Несомненно, данный подход позволяет минимизировать имеющуюся проблему, однако при этом серьёзно усложняется контролируемое изменение профиля травления по всей поверхности образца (чем больше расстояние от диафрагмы до обрабатываемой детали, тем сложнее контролировать формирующийся профиль в силу той же расходимости ионного пучка, что особенно важно при создании поверхностей со значительным градиентом глубины травления).

В рамках диссертации был проведен анализ влияния смещения диафрагмы относительно оси вращения и предложен альтернативный метод, минимизирующий неравномерность ионного травления вблизи оси вращения и сохраняющий все преимущества близости диафрагмы и обрабатываемой детали.

Проиллюстрируем неоднозначность обработки детали в окрестности центра вращения на модели. В ходе осесимметричной обработки заготовка вращается относительно некоторой оси вращения с равномерной скоростью. В задаче ионной полировки требуется получить распределение $H(r) = \text{const}$. Формируемый профиль травления 3.1 в таком случае будет выражаться как 3.2:

$$H(r) = \text{const} = \frac{N}{2\pi r \omega} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{\text{etching}}(r, \varphi) r d\varphi \quad (3.2)$$

Для анализа влияния ошибки позиционирования диафрагмы рассмотрим, как изменится распределение профиля травления при малом смещении диафрагмы (смоделируем ситуацию, соответствующую неточной установке диафрагмы относительно обрабатываемой детали). Определим неточность установки диафрагмы как δR , и рассмотрим, как изменится угол открытой дуги диафрагмы $\delta\alpha$. На рисунке 3.7. представлено схема, связывающая δR и $\delta\alpha$.

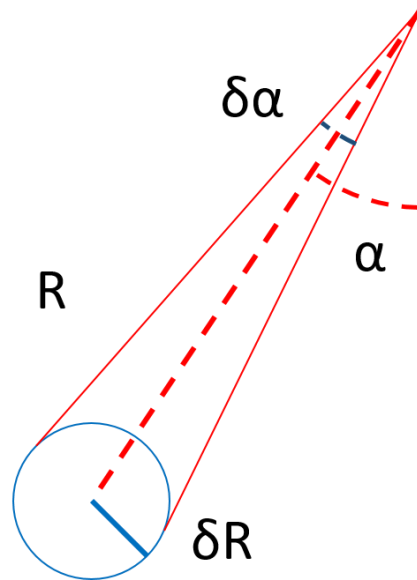


Рисунок 3.7. Графическое пояснение изменения угла, ограничивающего длину дуги открытой части диафрагмы при её смещении

Можно видеть, что малое смещение диафрагмы (δR) приведёт к тому, что вершина диафрагмы сместится в пределах обозначенной синей окружности, за счёт чего можно оценить изменение угла, ограничивающего длину дуги открытой части диафрагмы, и как следствие изменение скорости травления на данном радиусе. Зависимость изменения пределов интегрирования от радиуса при сдвиге диафрагмы может быть оценена с помощью формулы 3.3,

$$\delta\alpha \leq \arcsin\left(\frac{\delta R}{R}\right) \quad (3.3)$$

δR – малое смещение диафрагмы, α – угол, ограничивающий длину дуги открытой части диафрагмы на радиусе R , $\delta\alpha$ – изменение угла α из-за сдвига диафрагмы. Глубина травления на больших расстояниях до оси вращения $R \gg \delta R$ практически не изменяется, так как при малой ошибке позиционирования диафрагмы пределы интегрирования на больших радиусах изменяются слабо, формула 3.4.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \delta\alpha(R) = 0 \quad (3.4)$$

В области вблизи оси вращения $R \leq \delta R$, следовательно, полный угол открытой дуги диафрагмы может изменяться от 0 до 360°. Соответственно, можно выделить два случая: ось вращения из-за сдвига попадает в закрытую диафрагмой область и ось вращения попадает в открытую область. В зависимости от этого, вблизи оси вращения формируется

либо бугор, либо яма. Таким образом, получается, что возникновение резкой неоднородности глубины травления в области вблизи центра вращения связано с наличием диафрагмы в этой области.

Для решения данной проблемы было предложено отнести ось вращения детали от центра распределения ионного тока в пучке. Рассмотрим, простейший случай обработки плоской заготовки ионным пучком с гауссовым распределением скорости травления в плоскости детали и отсутствия обрезающей диафрагмы. Проследим, как будет изменяться профиль травления, при изменении расстояния от центра ионного источника до оси вращения. Отметим, что вид распределения не принципиален и в данном случае нормальное распределение выбрано из соображения простоты расчетов. Пусть ширина гауссова распределения скорости травления на полувысоте FWHM составляет 10 условных единиц, выражение 3.5

$$Z = e^{\left(\frac{-R^2 \cdot \ln(0.5)}{(\frac{FWHM}{2})^2}\right)} = e^{\left(\frac{-R^2 \cdot \ln(0.5)}{25}\right)} \quad (3.5)$$

На рисунке 3.8. представлены распределения профилей травления при последовательном смещении оси вращения от центра ионного пучка, расстояния указаны в FWHM. Можно видеть, что распределение глубины ионного травления при малых расстояниях выглядит как единый бугор, который разделяется на два при увеличении расстояния.

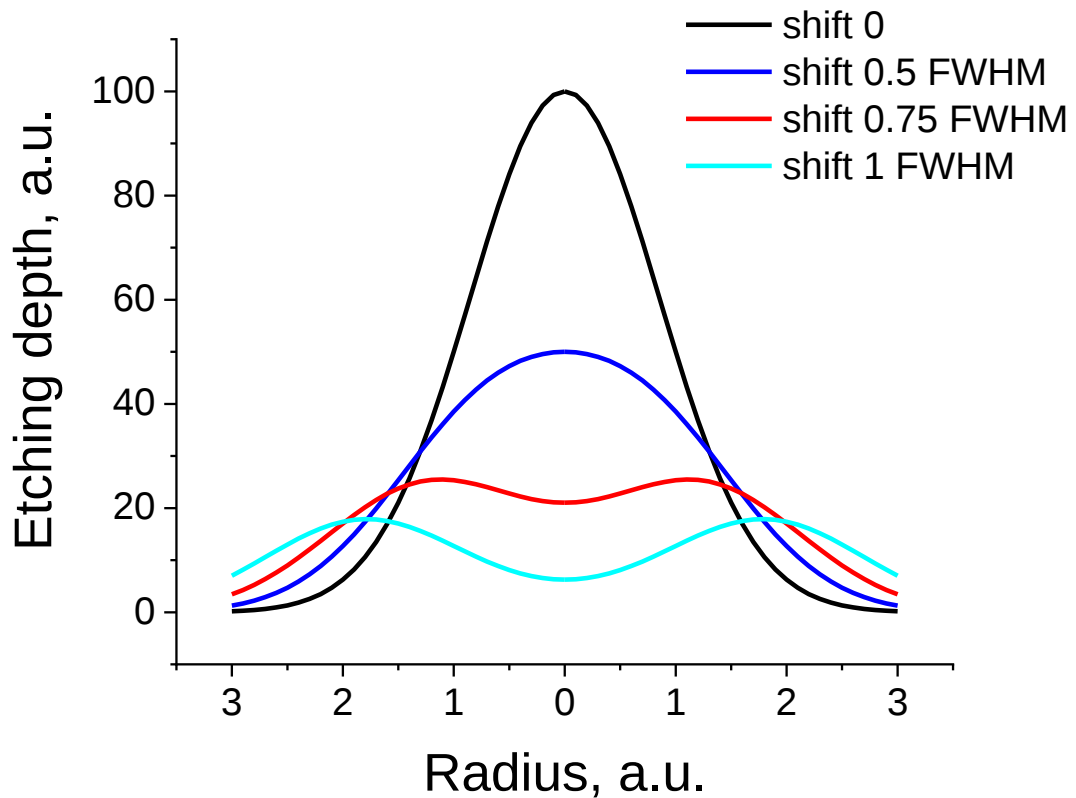


Рисунок 3.8. Изменение распределения глубины травления при различных расстояниях от центра ионного пучка до оси вращения.

Как можно видеть из рисунка 3.8 при достаточно большом смещении оси вращения от центра ионного пучка в области вблизи оси вращения детали (радиус = 0) распределение удаления материала имеет локальный минимум и наблюдается область ненулевой ширины с равномерной глубиной травления в отсутствии диафрагмы. Для того, чтобы добиться равенности глубины травления вдоль всего радиуса заготовки необходимо внести обрезавшую диафрагму в области больших радиусов. Введение диафрагмы позволит локально уменьшить глубину травления. Рассмотрим внесение диафрагмы для случая, соответствующему сдвигу 0.75 FWHM.

В таком случае для формирования равномерного профиля травления можно привести следующий алгоритм введения диафрагмы: для каждого радиуса будем сужать открытую область, пока глубина травления не станет равной таковой на оси вращения (рисунок 3.9). При таком подходе в области вблизи оси вращения отсутствует диафрагма, так как необходимая глубина травления в ней достигается без диафрагмирования.

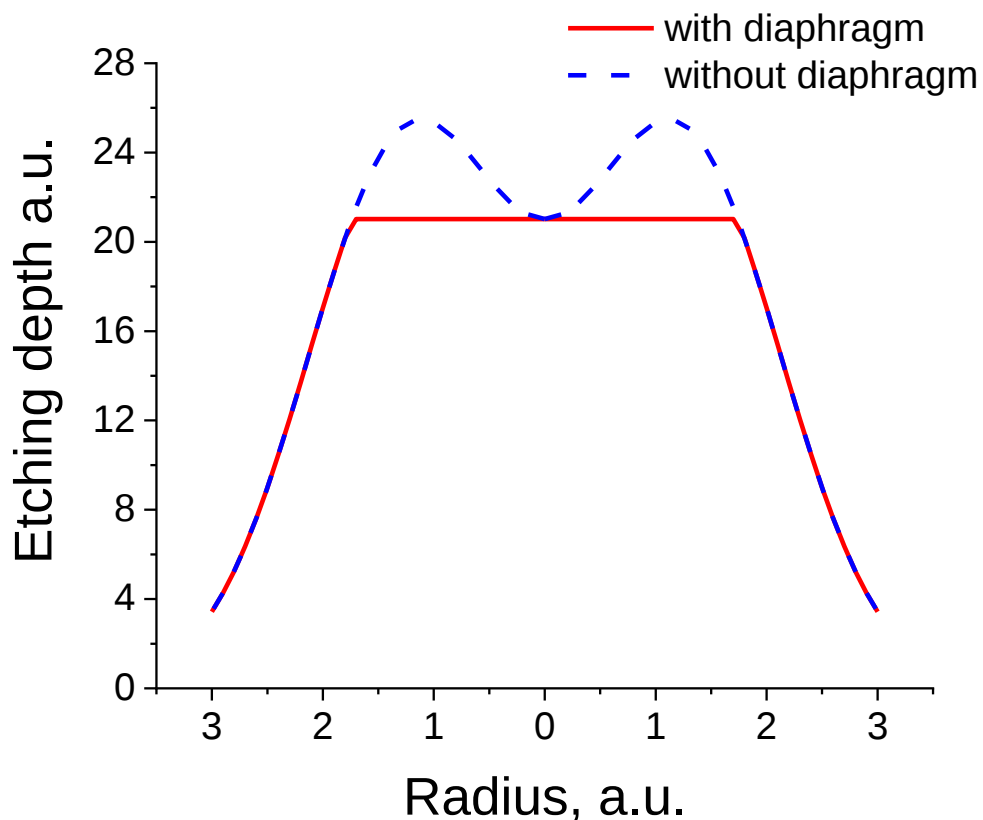


Рисунок 3.9. Изменение распределения глубины травления за счёт внесения диафрагмы.

Экспериментальная проверка

Предложенная методика была применена для ионно-пучковой полировки поверхности сферической подложки, изготовленной из монокристаллического кремния $\langle 110 \rangle$, диаметром 105 мм, толщиной 20 мм и радиусом кривизны $R = 587.7$ мм; фотография подложки показана на рисунке 3.10.



Рисунок. 3.10. Фотография подложки из кремния.

Для ионного источника КЛАН-163М, была рассчитана обрезающая ионный пучок диафрагма, обеспечивающая область равномерности R до 150 мм. В этом случае потребовалось вынести ось вращения от центра ионного источника на расстояние $l=90$ мм. На рисунке 3.11 представлена фотография изготовленной диафрагмы, также отмечено положение оси вращения обрабатываемой заготовки и положение центра ионного источника. Можно видеть, что вблизи оси вращения существует область, в которой диафрагма отсутствует.

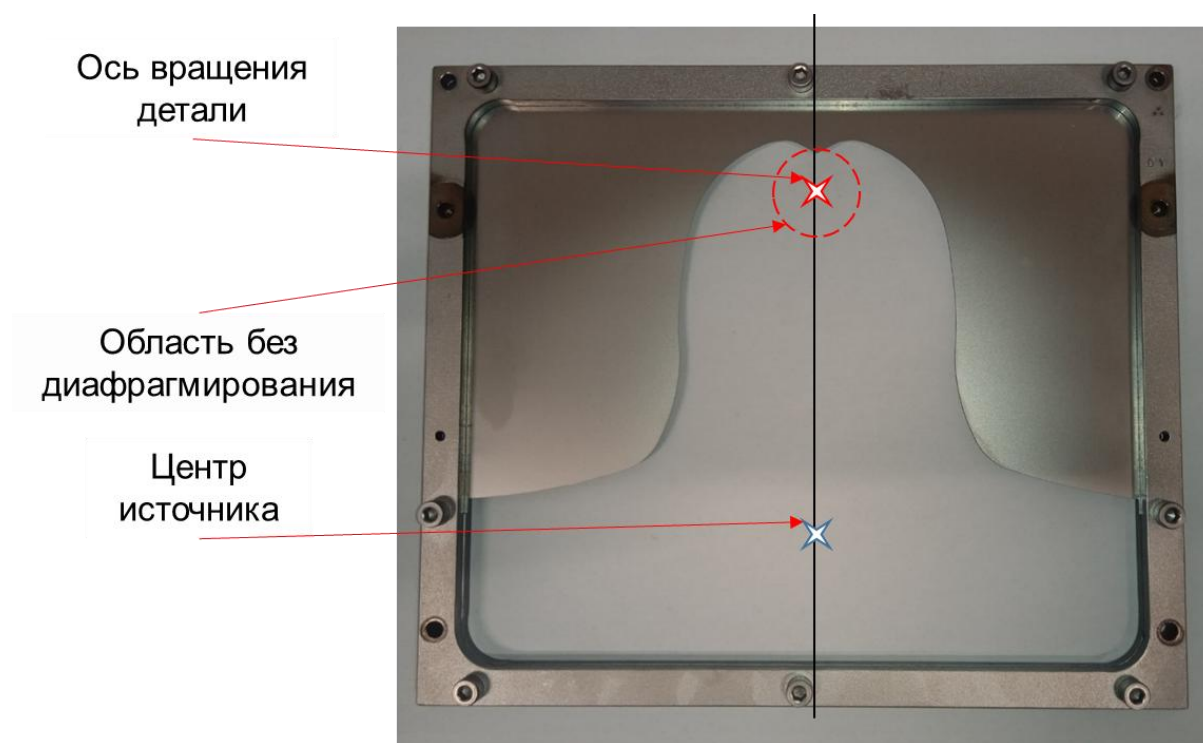


Рисунок 3.11. Фотография фигурной диафрагмы для формирования равномерного профиля травления. На фотографии отмечены положения центра распределения ионного пучка и оси вращения при обработке. Красная окружность пунктиром – область без диафрагмирования.

Через представленную диафрагму было проведено тестовое ионное травление. Распределение глубины травления по радиусу обрабатываемой детали представлено на рисунке 3.12.

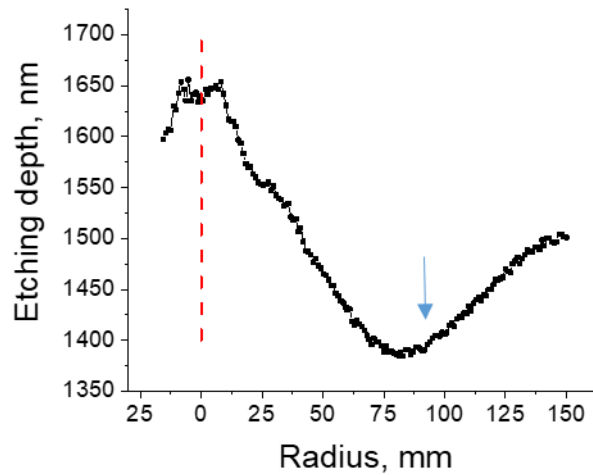


Рисунок 3.12. Радиальное распределение глубины ионного травления. Ось абсцисс представляет радиальное положение на подложке. Вертикальная ось показывает измеренную глубину ионного травления. Отмечены положения оси вращения (пунктирная линия) и центра ионного пучка (стрелка).

Можно видеть, что наблюдается некоторое (на уровне 13%) отклонение экспериментального профиля от $H(r)=\text{const}$, однако, в области, находящейся рядом с осью вращения, осуществлено близкое к равномерному травление (профиль близок к $H(r)=\text{const}$). Для повышения точности обработки (получения $H(r)=\text{const}$ для всех $r=0-150$ мм) диафрагма была 2 раза скорректирована, результат ионного травления после коррекции представлен на рисунке 3.13.

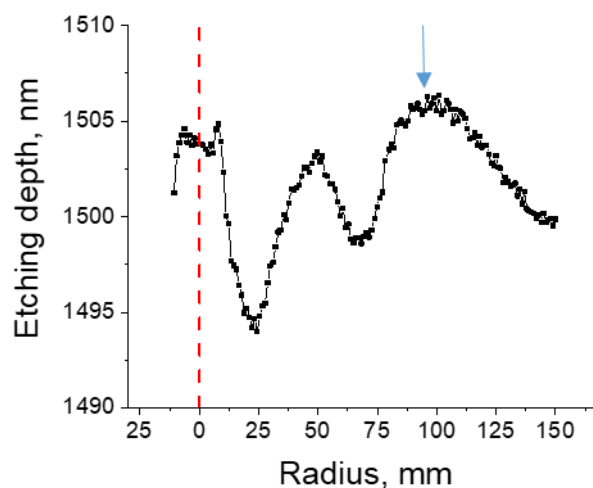


Рисунок 3.13. Распределение глубины ионного травления после 2х коррекций фигурной обрезающей диафрагмы. Ось абсцисс представляет радиальное положение на подложке. Вертикальная ось показывает измеренную глубину ионного травления. Отмечены положения оси вращения (пунктирная линия) и центра ионного пучка (стрелка).

Как можно видеть, получено близкая к равномерному ($H(r)=\text{const}$) зависимость глубины травления от радиуса (ошибка PV составила менее 1%).

С помощью изготовленной диафрагмы была проведена полировка кремниевой подложки, показанной на рисунке 3.10. Микрошероховатость поверхности была измерена с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) [94]. На рисунке 3.14 показаны АСМ-изображения поверхности заготовки площадью 40×40 мкм и функция спектральной плотности мощности от шероховатости до и после полировки.

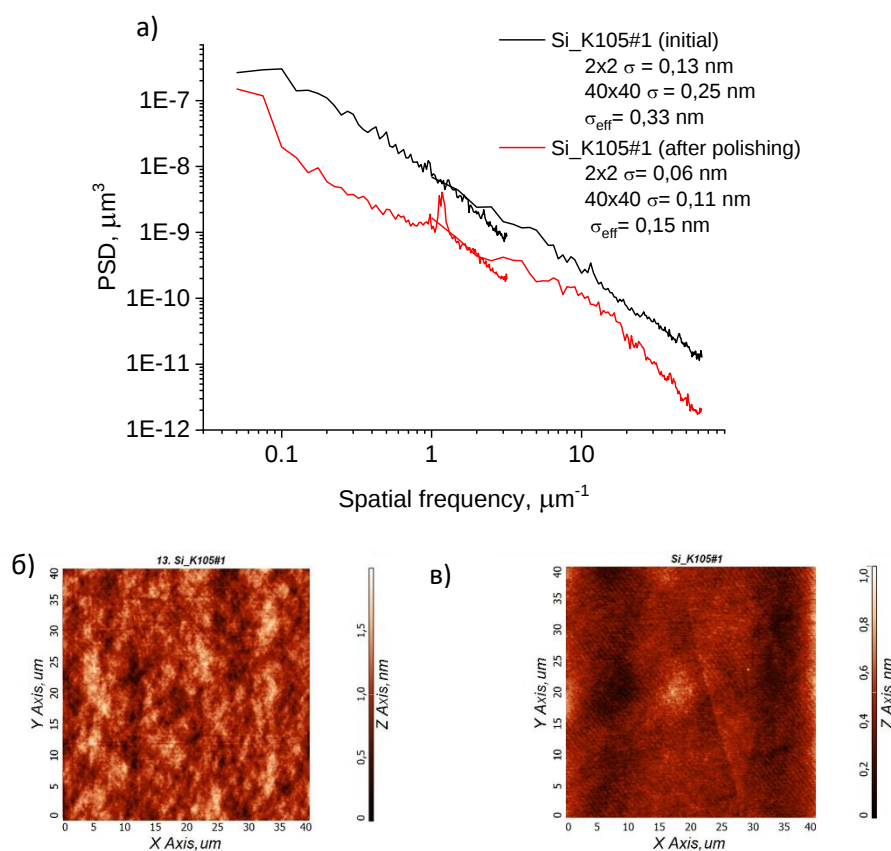


Рисунок 3.14. PSD функция шероховатости до и после ионной полировки (а) и АСМ кадры 40×40 мм² поверхности заготовки до (б) и после (в) ионной полировки.

Значительное снижение эффективной шероховатости было достигнуто в диапазоне пространственных частот $q = [2.5 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1}]$: величина σ_{eff} уменьшилась с исходных 0.33 нм до 0.15 нм. Данный результат превосходит значения, приведенные в работе [47]. Для контроля формы поверхности использовался интерферометр с дифракционной волной сравнения [111]. Карты отклонения поверхности от идеальной

сферы до и после ионно-пучковой полировки, а также их разность представлены на рисунке 3.15

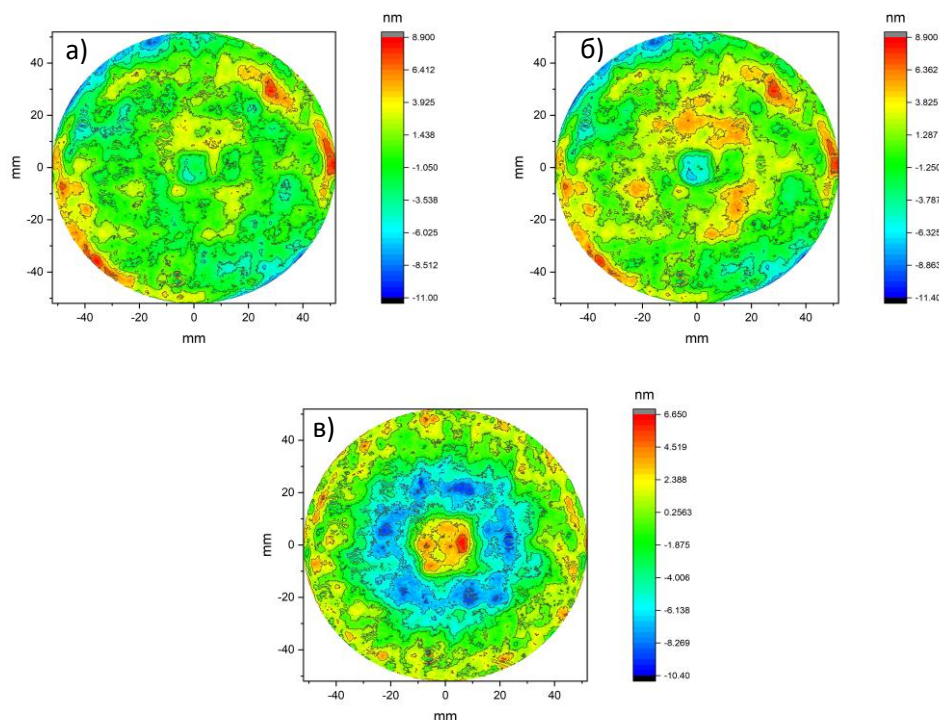


Рисунок 3.15. Карты отклонения формы поверхности от идеальной сферы до (а) и после (б) ионно-пучковой полировки. СКО составляют 2.5 нм и 3.7 нм соответственно. На карте (в) представлено отклонение между двумя измерениями с СКО = 2.7 нм.

Как можно видеть, обработка поверхности с использованием маски, представленной на рисунке 3.11, не привела к ухудшению формы поверхности. Это подтверждается отсутствием дефектов в центре заготовки (вблизи оси вращения), а также малым среднеквадратичным отклонением в 2.7 нм между картами поверхности до и после обработки, что показано на рисунке 3.15в.

Таким образом, был предложен и экспериментально подтвержден новый подход к осесимметричной обработке поверхностей оптических компонентов с использованием широкоапертурного сильноточного ионного источника. Данный метод успешно решает проблему наличия особой точки, вызванной сложностью совмещения вершины маски, формирующей ионный пучок, с осью вращения заготовки.

Таким образом, в рамках диссертационной работы развита методика осесимметричной обработки оптических деталей широкоапертурным сильноточным ионным пучком. Предложен подход, упрощающий процедуру настройки взаимного расположения

формирующей ионный пучок диафрагмы и оси вращения обрабатываемой детали, что особенно важно для деталей, не имеющих центрального отверстия. Представленное решение позволяет существенно упростить процесс итерационного исправления формы сечения обрезающей ионный пучок диафрагмы и юстировки диафрагмы относительно оси вращения детали. Решение предполагает вынесение оси вращения детали наклон распределения ионного пучка, и сохранение полностью открытым сечения обрезающей ионный пучок диафрагмы в некоторой окрестности вокруг оси вращения. Предложенный подход был экспериментально апробирован, удалось изготовить диафрагму для равномерного травления широким ионным пучком с параметрами отклонения экспериментального профиля от расчетного ($H(r)=\text{const}$) на радиусах 0-150 мм: СКО = 3 нм и $PV = 12$ нм, при средней глубине травления $H_{\text{average}}=1502$ нм, что составляет 0.8%.

3.1.2. Осесимметричная коррекция формы оптических элементов

Существуют задачи, для которых требуемая зависимость глубины травления от радиуса детали не может быть задана аналитически на этапе постановки задачи. В данном случае требуется проводить поиск соответствующего профиля травления по данным карты ошибок формы поверхности. Примером такой задачи является коррекция осесимметричных ошибок формы.

Изготовление заготовок методом механического притира производится при осевом вращении полировальника, что в большинстве случаев приводит к возникновению ошибок формы, имеющих осевую симметрию. Поэтому выделение осесимметричной составляющей из карты отклонения формы поверхности от сферы (плоскости) с последующим ее удалением широким сильноточным ионным пучком может существенно улучшить форму поверхности детали.

Выделение осесимметричной составляющей ошибки формы поверхности может выполняться различными способами в зависимости от геометрии образца и этапа обработки. Можно выделять осесимметричную часть из полиномиального разложения формы поверхности (наиболее удобно применять определённые на окружности единичного радиуса полиномы Цернике, разложение по которым используется в большинстве современных интерферометров [112]), либо решать задачу оптимизации, вводя целевую функцию, определяющую качество результирующей поверхности и минимизировать её. В качестве целевой функции может использоваться СКО ошибок формы поверхности, что соответствует критерию Марешаля на качество оптической

поверхности, либо объём удаляемого с поверхности материала, определяемый как $V = \iint S(x, y) dx dy$, где $S(x, y)$ – карта ошибок формы поверхности, что позволяет сократить время последующей финишной обработки (коррекция малоразмерным слаботочным ионным пучком). Таким образом, в зависимости от этапа обработки и геометрии заготовки может быть выбран соответствующий критерий. На рисунке 3.16. схематично представлены условия применимости разных подходов выделения осесимметричной части ошибки формы поверхности.

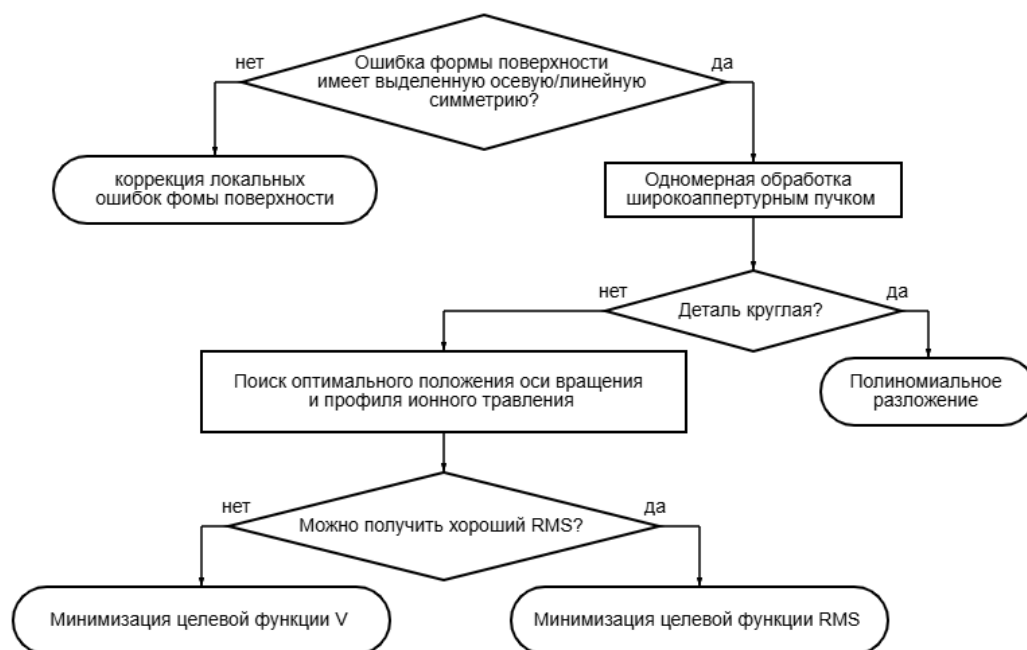


Рисунок 3.16. Схема выбора метода обработки

Данная методика применялась при изготовлении различных рентгенооптических элементов. На рисунке 3.17 представлен пример выделения осесимметричной составляющей ошибки формы поверхности, выполненного с использованием программного обеспечения интерферометра ИДВС по полиномам Цернике. Измерения проводились для образца, изготовленного методом механического притира, имеющего следующие параметры: внешний диаметр $d_{\text{ex}} = 72$ мм, радиус кривизны $R = 529.7$ мм, диаметр центрального отверстия $d_{\text{in}} = 28$ мм.

Карта отклонений формы поверхности от идеальной сферы для данного образца показана на рисунке 3.17. Расчетное время коррекции формы такой поверхности малоразмерным ионным пучком с характеристиками: $\text{FWHM} = 2.5$ мм (ширина пучка на полувысоте), $I_{\text{ion}} = 1$ мА (пункт 2.3.2), составляет 13 часов.

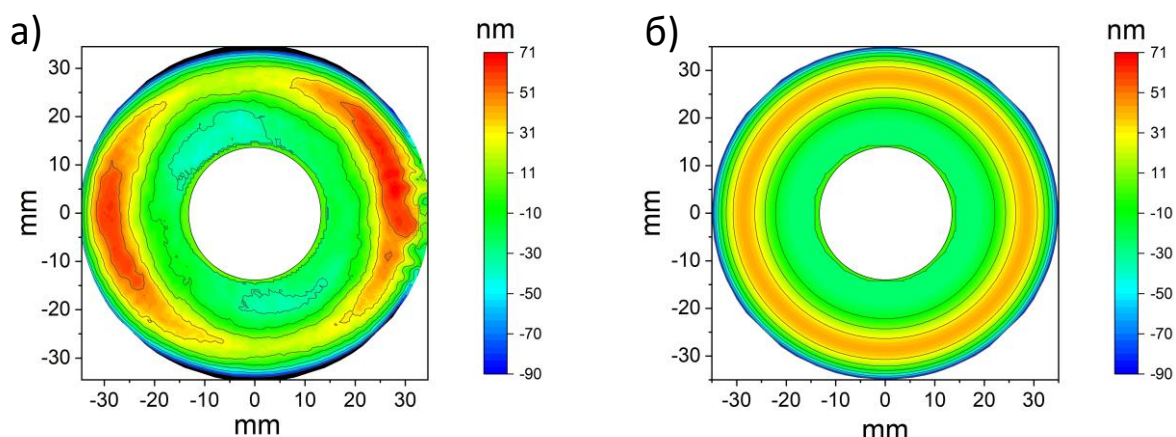


Рисунок. 3.17 а) Карта отклонений формы поверхности до обработки ионным пучком $PV = 244$ нм, $SKO = 37.7$ нм. б) Осесимметричная составляющая погрешности формы поверхности $PV = 146.5$ нм, $SKO = 31.0$ нм.

Выделенная с помощью четных полиномов Цернике осесимметричная составляющая ошибок формы поверхности представлена на рисунке 3.17б, ее SKO составляет более 80% от общего SKO поверхности.

Карта поверхности заготовки после симметричной коррекции, представленная на рисунке 3.18, демонстрирует значительное улучшение формы поверхности по сравнению с исходным состоянием: значение SKO -отклонения уменьшилось более чем в 4 раза - с исходных 37.7 нм до 8.4 нм. Полученные результаты подтверждают эффективность использованного подхода, показывая снижение осесимметричных составляющих ошибки формы и достижение заданного профиля поверхности.

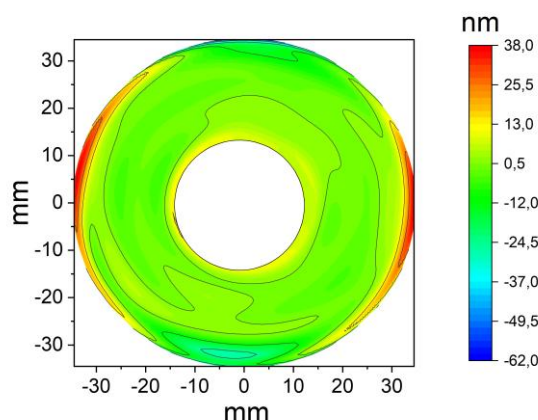


Рисунок 3.18. Карта ошибки формы поверхности после осесимметричной ионной обработки ($PV = 100.2$ нм, $SKO = 8.4$ нм).

Пример выделения осесимметричной составляющей для образца прямоугольной формы представлен на рисунке 3.19. Образец представляет собой параллелепипед из монокристаллического кремния размером 80x30x30 мм, ориентация рабочей стороны $\langle 110 \rangle$. Исходные характеристики поверхности (рисунок 3.19): отклонение карты ошибок формы поверхности по параметру СКО = 121.5 нм; размах высот PV = 1022.7 нм, объём удаляемого с поверхности материала $V = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$.

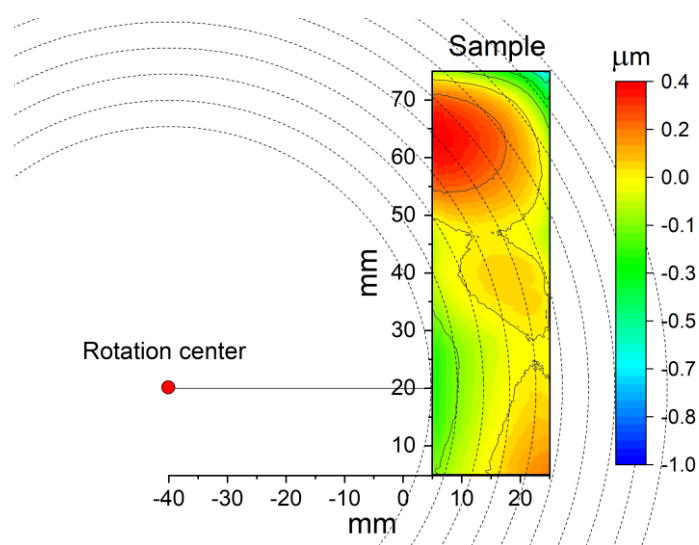


Рисунок 3.19. Карта отклонения поверхности монокристалла кремния до обработки, и найденное положение центра вращения.

Расчётное время обработки данной поверхности малоразмерным ионным пучком с параметрами $\text{FWHM} = 2.5 \text{ мм}$, $I_{\text{ion}} = 1 \text{ мА}$, без предварительной осесимметричной коррекции составляет 22 часа. Для уменьшения времени локальной коррекции было решено провести минимизацию объема удаляемого с поверхности материала с помощью осесимметричной обработки широкоапертурным сильноточным ионным источником.

По исходной карте распределения ошибки формы поверхности было найдено положение оси вращения и рассчитана диафрагма. Полное время работы источника в процессе обработки составило 105 мин. Образец находился в пучке примерно $\frac{1}{2}$ всего времени работы источника (максимальный угол, ограничивающий открытую область диафрагмы составлял 200°). В результате обработки была получена поверхность, карта отклонения формы которой от идеальной плоскости представлена на рисунке 3.20.

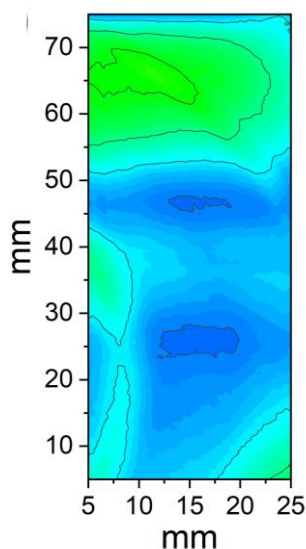


Рисунок 3.20. Карта отклонения поверхности монокристалла кремния, полученная в ходе эксперимента: СКО = 85 нм, PV = 1 мкм, $V = 0.52 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$.

Как можно видеть, объём удаляемого с поверхности материала уменьшился в 4.2 раза до $V = 0.52 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, а, следовательно, пропорционально уменьшилось и времени финальной локальной коррекции.

Преимуществом данного метода по сравнению с коррекцией формы малоразмерным ионным пучком является возможность обработки нескольких образцов за одну итерацию. Зачастую малоразмерные заготовки подложек зеркал вырезаются из единой большой заготовки, а, следовательно, осесимметричные ошибки, сформировавшиеся при механическом притире на исходной заготовке, будут характерны для вырезанных из нее малоразмерных деталей.

В качестве примера рассмотрим заготовки подложек зеркал для системы Киркпатрика – Баеза, состоящей из пары зеркал с формой в виде сегмента параболического цилиндра [113]. Две заготовки с размерами 70×25×30 мм были вырезаны из единой болванки плавленого кварца, фото одной из них представлено на рисунке 3.21а. Поверхность подвергалась глубокой шлифовке-полировке со снятием приповерхностного нарушенного слоя методом химико-механической полировки [27]. Измерения формы поверхности заготовок проводились при помощи лазерного интерферометра ZYGO Verifire 4 (ZYGO Corporation). Карты поверхности заготовок представлены на рисунке 3.21б.

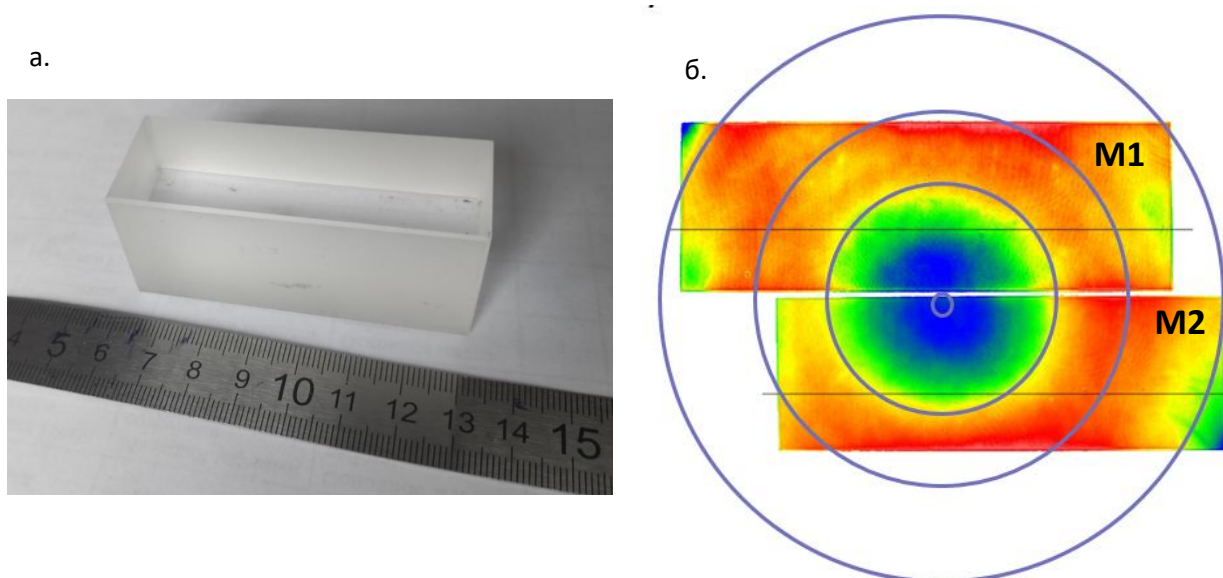


Рисунок 3.21 Фотография заготовки подложки зеркала М1(а) и карты формы поверхностей заготовок подложек зеркал М1 и М2 (б).

Как можно видеть (рисунок 3.21б), изготовленные методом механического притира заготовки имеют выраженную осевую симметрию с отклонением формы поверхности от плоскости СКО = 8.9 нм (подложка зеркала М1) и СКО = 9.1 нм (подложка зеркала М2) соответственно. Для минимизации ошибок перед формированием цилиндрического профиля образцы требовалось довести до плоскости. Для получения оптических плоскостей был применён метод выделения осесимметричной компоненты и удаление ее широкоапертурным сильноточным ионным пучком через формирующую ионный пучок диафрагму. Форма поверхности образцов после процедуры коррекции представлена на рисунке 3.22.

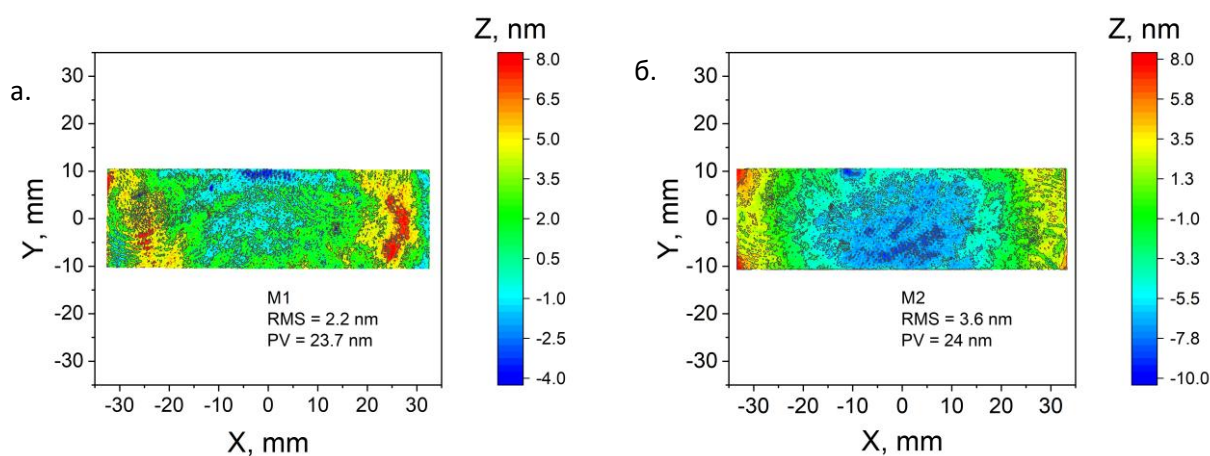


Рисунок 3.22. Карта поверхности подложек коллимирующей КБ-системы после осесимметричной коррекции. а. Подложки зеркала М1 (PV=40.4 нм, СКО=2.5 нм); б. Подложки зеркала М2 (PV=49.3 нм, СКО=2.3 нм).

Как можно видеть произошло значительное снижение ошибок формы поверхностей с исходных СКО ~ 9 нм до СКО $\sim 2-3$ нм.

Таким образом, применение осесимметричной обработки для коррекции формы поверхности позволяет существенно (в разы) сократить время наиболее трудоемкой и времязатратной финишной обработки малоразмерным слаботочным ионным пучком, а также проводить одновременную коррекцию нескольких образцов, вырезанных из одной общей заготовки. Однако существуют задачи, в которых требуется компенсировать aberrации, наведенные в следствии ошибок при установке детали в оптическую схему (кома, астигматизм и т.п.). Такого рода ошибки не могут быть описаны осесимметричным профилем образующей фигуры вращения, тем не менее в рамках диссертационной работы был предложен метод, позволяющий формировать неосесимметричный профиль.

3.2. Методика формирования полиномов Цернике

Для профилирования поверхности оптических элементов с целью компенсации наведенных в системе aberrаций удобно воспользоваться разложением по базисным поверхностям. Учитывая широкое применение в оптике ортогональных полиномов Цернике для описания волновых фронтов, была предложена методика целенаправленного формирования поверхностей, соответствующих полиномам Цернике произвольного порядка, посредством управляемого ионно-пучкового травления через формирующую ионный пучок диафрагму.

Как известно при анализе волновых aberrаций оптических систем используется разложение в ряд по полиномам Цернике, которые включают четные и нечетные функции. Четные полиномы определяются как:

$$Z_n^m(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) * \cos(m * \phi) \quad (3.6)$$

А нечётные полиномы имеют вид

$$Z_n^{-m}(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) * \sin(m * \phi) \quad (3.7)$$

где m и n - неотрицательные целые числа, причем $n \geq m$; ρ обозначает нормированный радиус ($0 \leq \rho \leq 1$), а ϕ - азимутальный угол. Радиальная составляющая полиномов определяется следующим выражением (уравнение 3.8):

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! (\frac{n+m}{2} - k)! (\frac{n-m}{2} - k)!} \rho^{n-2k} \quad (3.8)$$

Таким образом, полиномы Цернике представляются в виде произведения радиальной и азимутальной компонент.

Для формирования произвольного порядка полиномов Цернике было предложено модифицировать метод осесимметричной обработки. Основная идея заключается в том, что, изменяя скорость вращения обрабатываемой детали по периодическому закону с периодом кратным одному обороту, можно получить азимутальную зависимость формируемого на поверхности рельефа. С учётом переменной скорости вращения уравнение 3.1 запишется в виде 3.9

$$H(r, \varphi) = \frac{N}{2\pi r} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} \frac{v_{etching}(r, \varphi') r}{\omega(\varphi - \varphi')} d\varphi' \quad (3.9)$$

где $H(r, \varphi)$ – распределение глубины травления, $v_{etching}(r, \varphi)$ – распределение скорости травления, $\alpha(r)$ и $\beta(r)$ – углы, задающие форму диафрагмы и ограничивающие дугу открытой части на радиусе r , N – полное число оборотов, $\omega(\varphi)$ – мгновенная угловая скорость.

Для перехода к разделению переменных в (3.9) введем малый параметр $\Delta\theta = \beta(r) - \alpha(r)$ – угловой размер открытой дуги диафрагмы. Предположим, что на интервале интегрирования $[\varphi', \varphi' + \Delta\theta]$ функция $\omega(\varphi - \varphi')$ изменяется достаточно медленно, а ее относительное изменение $\Delta\omega/\omega$ мало. Это позволяет разложить подынтегральное выражение, вынеся $\omega(\varphi)$ за знак интеграла как постоянную на данном малом интервале величину.

$$H(r, \varphi) = \frac{N}{2\pi r} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} \frac{v_{etching}(r, \varphi') r}{\omega(\varphi - \varphi')} d\varphi' = \frac{N}{2\pi r \omega(\varphi)} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{etching}(r, \varphi') r d\varphi' + \varepsilon(r, \varphi) \quad (3.10)$$

Погрешность такого приближения можно оценить, рассмотрев первое отброшенное слагаемое разложения в ряд Тейлора. Основной вклад в ошибку $\varepsilon(r, \varphi)$ даст первая производная угловой скорости:

$$\varepsilon(r, \varphi) \sim \frac{N v_{etching}(r, \varphi) r}{2\pi r} \cdot \frac{\omega'(\varphi)}{\omega^2} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} (\varphi - \varphi') d\varphi' \sim \frac{N v_{etching}(r, \varphi) \omega'(\varphi) (\Delta\theta)^2}{4\pi \omega^2(\varphi)} \quad (3.11)$$

Таким образом, условием применимости приближения является малость углового размера диафрагмы $\Delta\theta$ и плавность изменения угловой скорости ($|\omega'(\varphi)|$ невелико).

С учетом данного приближения выражение (3.9) факторизуется и существенно упрощается:

$$H(r, \varphi) \approx \frac{N}{2\pi r \omega(\varphi)} \cdot \int_{\alpha(r)}^{\beta(r)} v_{etching}(r, \varphi') r d\varphi' = F(r) \cdot G(\varphi), \text{ где } G(\varphi) > 0 \quad (3.12)$$

Таким образом по данной методике могут быть сформированы поверхности, представляемые в виде произведения азимутальной и радиальных частей. Радиальная часть $F(r)$ определяется исключительно геометрией диафрагмы и распределением скорости ионного травления, в то время как азимутальная часть $G(\varphi)$ определяется законом изменения угловой скорости $\omega(\varphi)$. Важно отметить, что значение функции $G(\varphi)$ ограничено техническим пределом максимальной угловой скорости, что задает нижний предел для значений азимутальной компоненты профиля.

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cdot (\cos(m \cdot \varphi) + A - A) = R_n^m(\rho) \cdot (\cos(m \cdot \varphi) + A) - R_n^m(\rho) \cdot A \quad (3.13)$$

$$\omega(\varphi) = \frac{1}{\cos(m \cdot \varphi) + A} \quad (3.14)$$

Таким образом, оптическая поверхность, форма которой соответствует произвольному порядку полиномов Цернике может быть получена в ходе двухстадийной ионно-пучковой обработки широкоапертурным ионным источником через формирующую диафрагму. На первом этапе формируется осесимметричная часть при равномерном вращении детали, на втором этапе – неосесимметричная часть при неравномерном вращении детали.

Для иллюстрации предложенного метода рассмотрим возможность формирования оптической поверхности, задающейся полиномом Цернике с индексами Z_{22} , соответствующий абберации «астигматизм» рисунок 3.23.

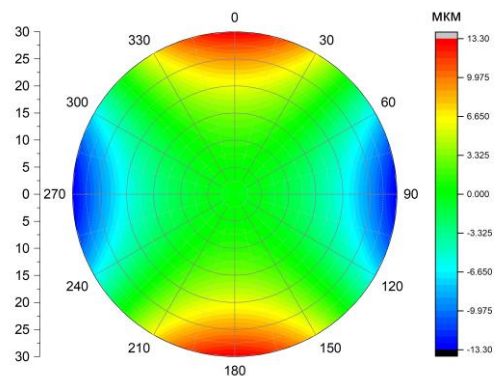


Рисунок 3.23 Значения полинома Цернике Z_{22} астигматизм.

Астигматизм описывается уравнением 3.15 в полярных координатах, на рисунке 3.23 представлена поверхность, соответствующая уравнению 3.13

$$H(\rho, \varphi) = \rho^2 * \cos(2\varphi). \quad (3.15)$$

Астигматизм может быть представлен как сумма двух поверхностей, представленных на рисунке 3.24. Осесимметричная часть описывается выражением 3.16:

$$-\rho^2 * C \quad (3.16)$$

Неосесимметричная составляющая описывается выражением 3.17:

$$\rho^2 * (\cos(2\varphi) + A) \quad (3.17)$$

где A - константа, $A > 1$. Выбирается из условий доступных для реального процесса (определяется максимальной возможной скоростью вращения детали).

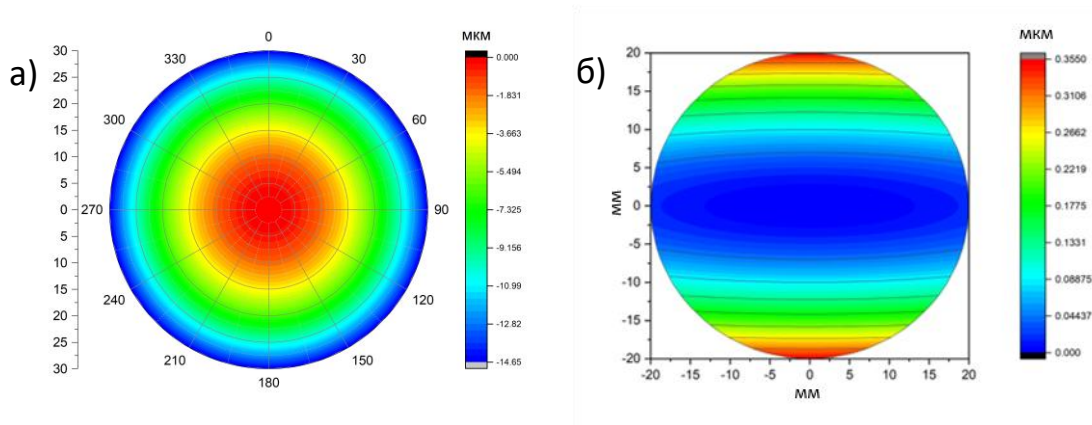


Рисунок 3.24 Астигматизм может быть представлен как сумма параболоида вращения (а) и эллиптического параболоида (б)

Для формирования требуемого распределения угловая скорость вращения должна изменяться согласно выражению 3.18. На рисунке 3.25 представлена зависимость угловой скорости вращения.

$$\omega = \frac{1}{\cos(2\varphi) + A} \quad (3.18)$$

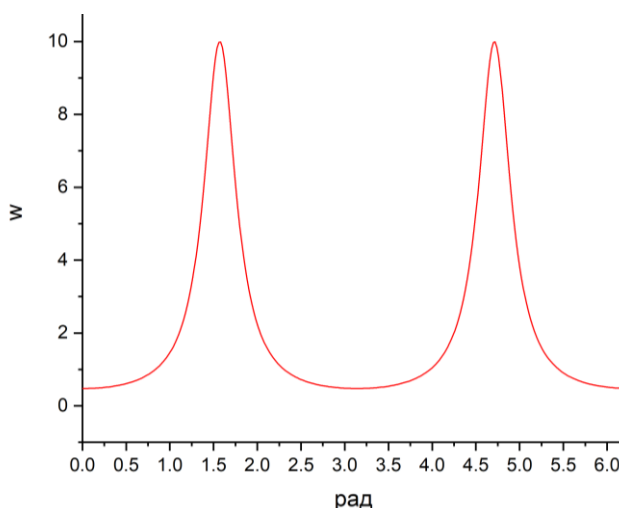


Рисунок 3.25 Угловая скорость вращения для формирования эллиптического параболоида

Сечение формирующей ионный пучок диафрагмы для создания, заданного неосесимметричного профиля, описывающегося выражением (3.16), в данном случае определяется выражением 3.19:

$$\varphi(\rho) \sim \rho^2 \quad (3.19)$$

На втором этапе необходимо создать осесимметричную составляющую. Для этого вырезается диафрагма с сечением описываемым следующим выражением:

$$\varphi(\rho) \sim \text{const} - \rho^2 \quad (3.20)$$

Вращение детали позади диафрагмы с таким сечением уже производится с равномерной угловой скоростью.

Таким образом, за счёт переменной скорости вращения формируется угловая зависимость распределения, а за счёт маски формируется радиальная зависимость. Размер ошибки при этом может быть снижен за счёт уменьшения открытой дуги диафрагмы.

В рамках диссертационной работы предложена методика компенсации широкого класса волновых aberrаций, возникающих в оптической системе в следствии различных причин (ошибок в установке, деформации элементов, внеосевого падения излучения и т.п.) и описываемых полиномами Цернике. Математически обоснована возможность разделения переменных в уравнении травления на радиальную и азимутальную компоненты. Таким образом, метод реализуется за счёт комбинации стандартной

осесимметричной обработки с добавлением стадии, создающей азимутальную зависимость профиля за счет переменной скорости вращения заготовки, что позволяет создавать корректоры волнового фронта для компенсации оптических аберраций

3.3. Формирование рентгенооптических элементов скользящего падения

В жестком рентгеновском диапазоне длин волн для таких задач как коллимация и фокусировка СИ, рефлектометрия, диагностика плазмы и др. также существует потребность в высокоточных рентгенооптических элементах. Работа в пределах критического угла полного внешнего отражения (ПВО) обеспечивает близкий к 100% коэффициент отражения рентгеновского излучения, однако, малые углы падения приводят к низкой светосиле оптических систем на принципах ПВО. Для ряда приложений увеличение светосилы удастся добиться применением многослойного отражающего покрытия (зеркала Гёбеля [114,115]), однако, такие системы работают только на выбранной длине волны, поэтому повышение светосилы зеркала добиваются применением зеркал сложной (асферической) формы.

3.3.1. Формирование тороидальных поверхностей ионно-пучковыми методами

Тороидальное зеркало имеет большую светосилу по сравнению со сферическими зеркалами и позволяют получать лучшие пятна фокусировки за счет оптимизации фокусирующих свойств зеркала в горизонтальной и сагиттальной плоскостях. Такие отражатели проще в изготовлении, чем зеркала с поверхностью, описываемой параболоидом или эллипсоидом. Им свойственны сферические аберрации и кома, но не страдают от астигматизма, как сферическое зеркало, при использовании внеосевой геометрии, при условии, что угол падения соответствует проектному углу. Поскольку они проще в изготовлении, они намного дешевле эллипсоидальных или параболоидальных зеркал при том же качестве поверхности. Однако изготовление тороидальных зеркал традиционными методами притира невозможно из-за значительного различия радиусов кривизны в горизонтальной и сагиттальной плоскостях. Изготовление асферик методами точения приводит к развитию шероховатости, что существенно снижает эффективность отражателей в рентгеновском диапазоне длин волн, где предъявляются повышенные требования к качеству отражающих поверхностей. Причем для эффективного отражения требуется низкая шероховатость, то для обеспечения высокого качества фокусировки с уменьшением длины волны повышаются требования на качество формы поверхности.

В рамках диссертационной работы предложены новые методики изготовления с помощью ионно-пучкового травления элементов с тороидальным профилем, а также приводится результат формирования опытного образца тороидального зеркала с отклонением от кругового цилиндра более 30 мкм.

Тороидальные оптические поверхности изготавливаются из цилиндрических заготовок, где образующей цилиндра является окружность меньшего радиуса, т.е. имеющая большую из двух стрелку прогиба. Вторую окружность при этом возможно изготавливать методом ионно-пучкового травления через формирующую ионный пучок диафрагму. Поскольку окружности, задающие тороидальную поверхность взаимно перпендикулярны, то формирование такой поверхности возможно за счет линейного перемещения заготовки с постоянной скоростью, позади задающей профиль ионного пучка диафрагмы в плоскости параллельной окружности, являющейся образующей исходного цилиндра (рисунок 3.26).

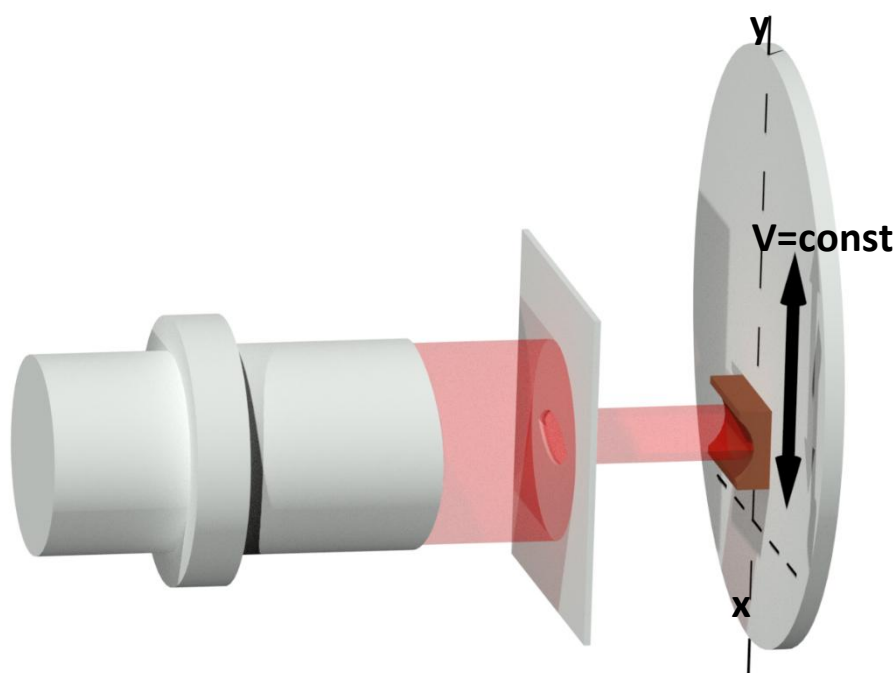


Рисунок 3.26. Схема методики формирования оптических элементов с формой поверхности в виде сегмента тора ионно-пучковым травлением.

Для реализации схемы, представленной на рисунке 3.26, необходимо рассчитать сечение формирующей ионный пучок диафрагмы таким образом, чтобы при прямолинейном и равномерном движении заготовки позади такой диафрагмы в плоскости

перпендикулярной движению формировался круговой профиль, соответствующий образующей тора с большим радиусом кривизны.

Для расчета сечения диафрагмы в общем виде для прямолинейного и равномерного движения позади нее заготовки необходимо решить следующее уравнение:

$$H(x) = N \cdot \int_{a(x)}^{\beta(x)} v_{etch}(x, y) dy \quad (3.21)$$

где $H(x)$ – глубина травления от поперечной координаты, $N=const$ – количество проездов позади маски, $a(x)$ и $b(x)$ – ширина щели в координате x , в случае симметричной диафрагмы $a(x) = -b(x)$, $v_{etch}(x, y)$ – распределение скорости ионного травления в области диафрагмы, y – направление вдоль которого происходит движение обрабатываемой детали.

В случае, если $v_{etch}(x, y) = const$ – скорость ионного травления постоянна в области диафрагмы, глубина ионного травления

$$H(x) = N \cdot v_{etch} \cdot (b(x) - a(x)) = N \cdot v_{etch} \cdot 2 \cdot a(x), \quad (3.22)$$

Отсюда следует, что $a(x)$ пропорционально требуемому профилю травления ($H(x)$):

$$a(x) = \frac{H(x)}{2 \cdot N \cdot v_{etch}} \quad (3.23)$$

В данном случае профиль травления является дугой окружности, т.е.

$$H(x) = \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (3.24)$$

где R – радиус окружности, образующей тора. Тогда ширина щели от координаты x будет иметь вид:

$$a(x) = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{N \cdot v_{etch}} \quad (3.25)$$

Как можно видеть из (3.23) в случае $v_{etch}(x, y) = const$ сечение диафрагмы пропорционально дуге окружности с радиусом R .

В случае, если скорость травления имеет некоторое распределение (т.е. $v_{etch}(x, y) \neq const$), то необходимо численно решать уравнение (3.21) с подстановкой в него выражения (3.24) - зависимости $H(x)$:

$$H(x) = \sqrt{R^2 - x^2} = N \cdot \int_{a(x)}^{\beta(x)} v_{etch}(x, y) dy, \quad (3.26)$$

В пункте 2.2.3 было найдено распределение ионного тока вдоль апертуры для источника ионов КЛАН-163М (диаметр выходной апертуры 150 мм) с квазипараллельным ионным

пучком. По этим данным была рассчитана диафрагма для ионно-пучкового формирования тороидальной поверхности.

Для изготовления оптического элемента тороидальной формы, использовалась заготовка с формой поверхности в виде кругового цилиндра. На рисунке 3.27 показан чертеж заготовки, ее габариты составили ДхШхВ – 90х60х15 мм, рабочая поверхность – 90х50 мм. На рисунке 3.28 приведена фотография заготовки.

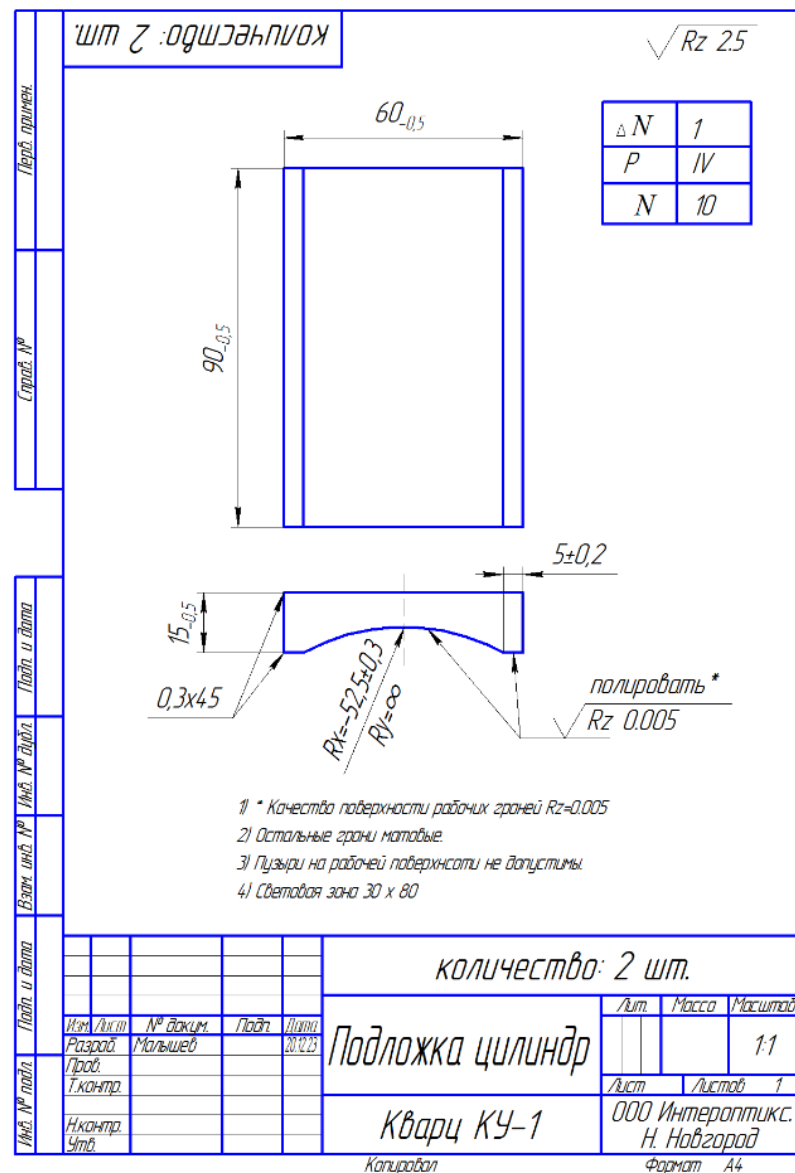


Рисунок 3.27. Чертеж заготовки для тороидального зеркала (круговой цилиндр).

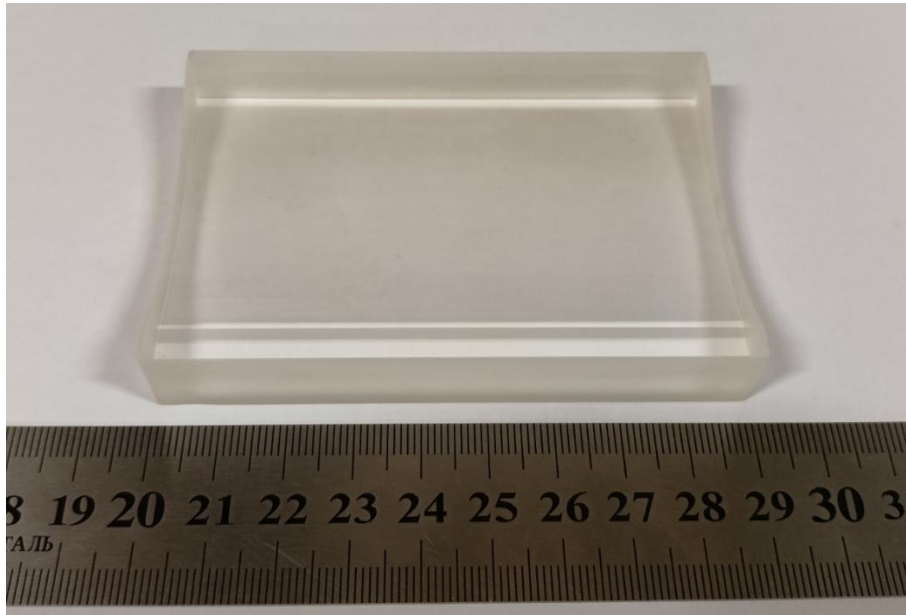


Рисунок 3.28. Фотография заготовки – вогнутый круговой цилиндр.

На рисунке 3.29 представлена дуга окружности, которую необходимо сформировать на поверхности цилиндрической заготовки в поперечном направлении.

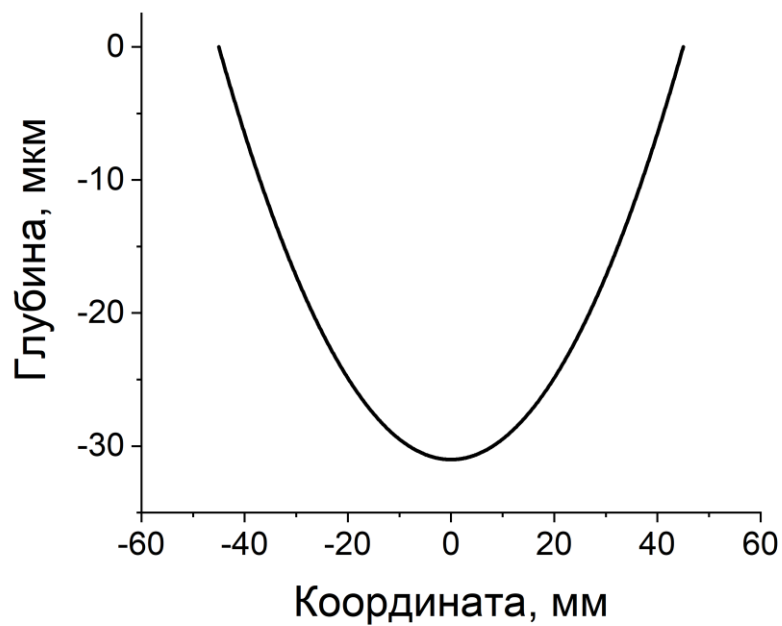


Рисунок 3.29. Дуга окружности радиуса $R_t=32564.8$ мм с хордой длиной 90 мм. (стрелка прогиба 31 мкм)

Решив уравнения (3.26) с учетом R_t и распределения ионного тока (рисунок 2.22) была получена диафрагма, представленная на рисунке 3.30.

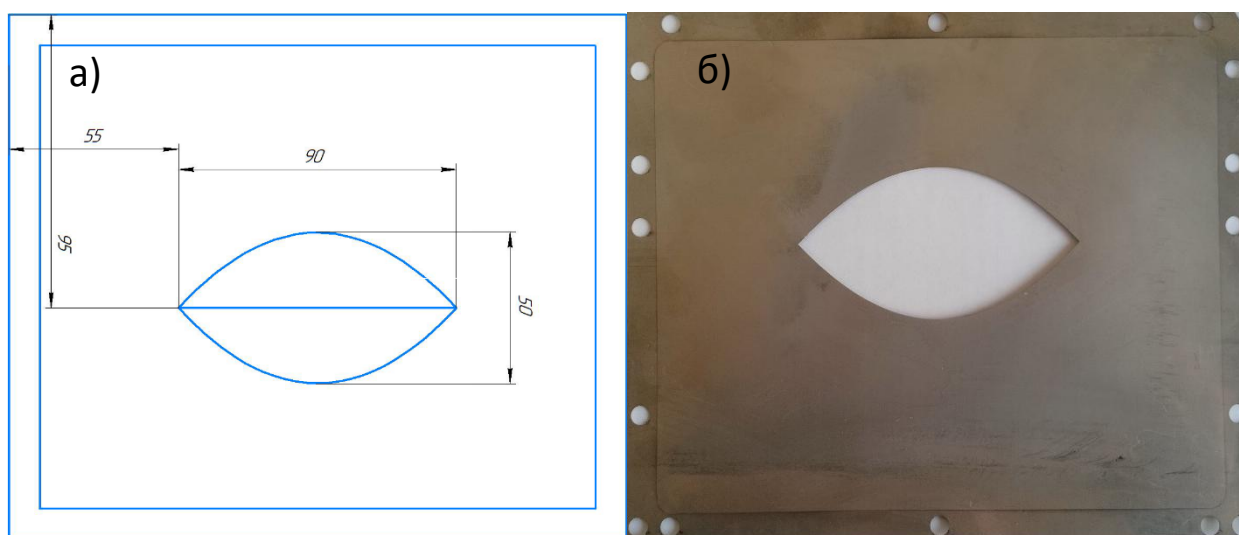


Рисунок 3.30. Чертеж (а) и фотография (б) обрезающей ионный пучок диафрагмы для формирования тороидальной поверхности.

На первом этапе в рамках тестового эксперимента производился контроль глубины и профиля травления, формирующегося в процессе травления через диафрагму, представленную на рисунке 3.30, согласно методике, описанной в пункте 3.1. Время травления в тестовом эксперименте составило 1 час, за это время на поверхности сформировалась ступенька, высота которой измерялась на интерференционном микроскопе. Результаты измерений представлены на рисунке 3.31.

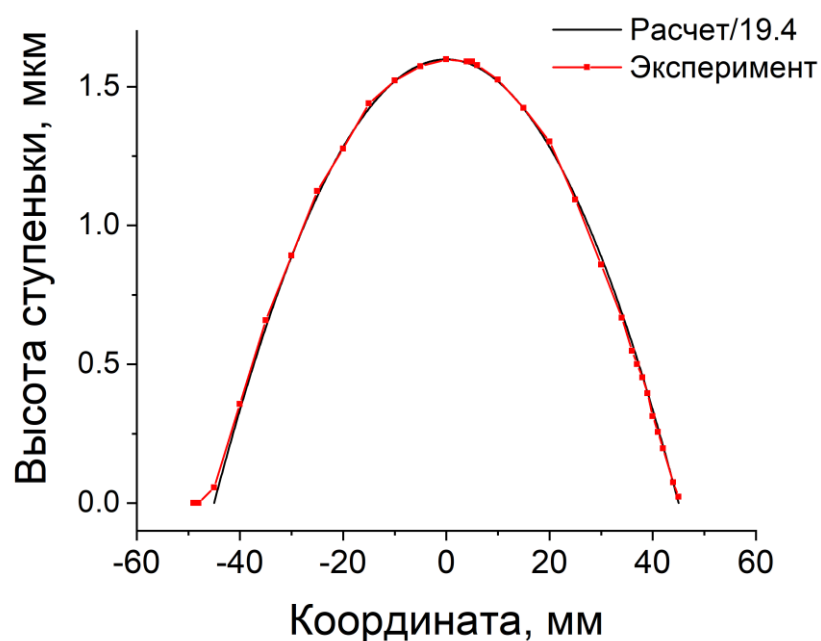


Рисунок 3.31. Профиль травления (высота ступеньки).

Как можно видеть, профиль с хорошей точностью повторяет требуемое распределение (СКО ошибки составляет 7 нм), а высота ступеньки в максимуме за время травления (1 час) составила 1.6 мкм. Зная величину стрелки прогиба дуги окружности, которую необходимо сформировать и скорость формирования профиля в установке ионно-пучкового травления, было вычислено полное время обработки $T = 19.4$ часов.

Для контроля формирующегося профиля каждые 4 часа проводилось измерение профиля осевого сечения заготовки с помощью микроинтерферометра белого света. На рисунке 3.32. Представлено изменение формирующегося профиля.

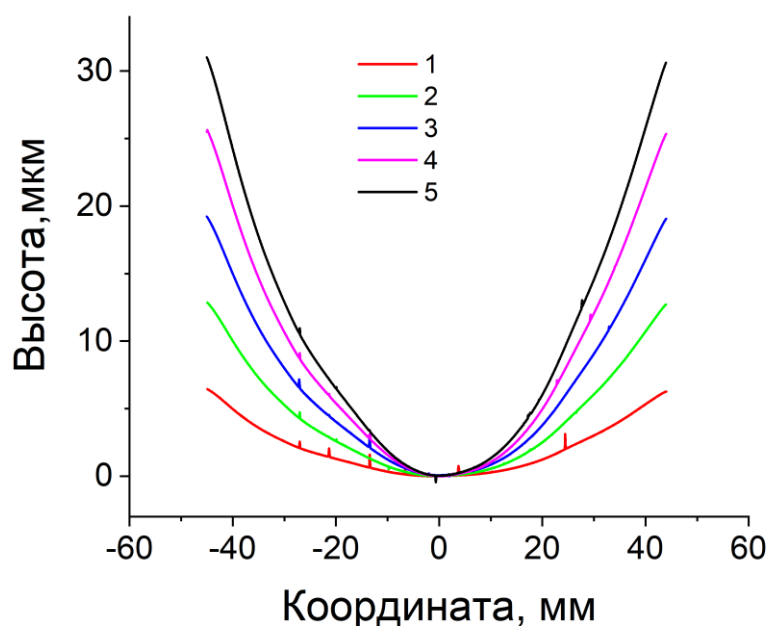


Рисунок 3.32. Профиль травления (измерение на интерферометре белого света).

Как можно видеть наблюдается пропорциональное нарастание глубины профиля осевого сечения до 31 мкм. После формирования профиля на глубину 31 мкм было произведено измерение формы поверхности полученной тороидальной поверхности с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения по схеме, описанной в [116]. На рисунке 3.33 представлена карта ошибок формы тороидальной поверхности (отклонение полученной поверхности от расчетной).

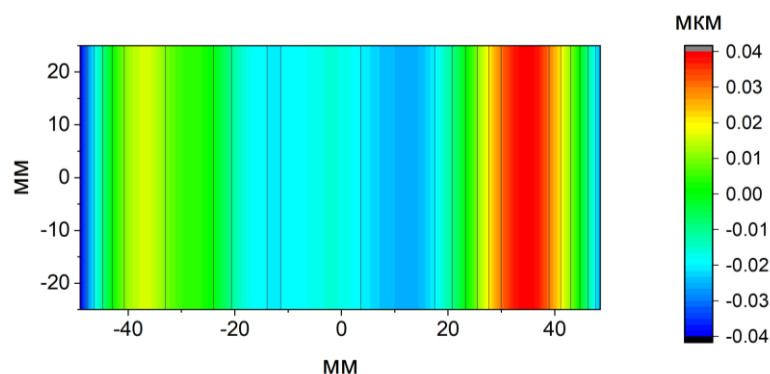


Рисунок 3.33. Карта ошибок формы поверхности опытного образца тороидального зеркала. Параметры: $PV=82$ нм, $СКО=20.5$ нм.

Измерения показали, что ошибки формы поверхности составили $PV=82$ нм и $СКО=20.5$ нм, что говорит, что методика позволяет изготавливать тороидальные поверхности с отклонением от исходного кругового цилиндра более 30 мкм с точностью лучше 0.5%. Представленный метод может быть применён при изготовлении различных оптических элементов скользящего падения. Кроме тороидов, изготавливаемых из заготовок цилиндрической формы, могут быть реализованы различные (например, эллиптические и параболические) цилиндры. Для формирования цилиндра необходимо использовать плоские заготовки, либо круговые цилиндры с образующей, наиболее близко отстоящей от требуемого профиля. Сечение маски в этом случае будет определяться профилем асферизации и задавать образующую цилиндра. Однако, существует ограничение применимости данного метода: размер образца не может превышать размеров ионного пучка. Для формирования цилиндрических поверхностей с габаритами, не ограниченными размером пучка ускоренных ионов, необходима модификация предложенного метода.

3.3.2 Формирование цилиндрических оптических поверхностей

Задача состоит в формировании образующей цилиндрического профиля, имеющего изменяющуюся глубину удаления материала вдоль длинной стороны образца (длина больше размеров ионного источника) и неизменную (одинаковую) вдоль короткой стороны. Для формирования заданного профиля был предложен подход, основанный на линейном перемещении образца с переменной скоростью позади формирующей ионный пучок диафрагмы, имеющей форму узкой щели (рисунок 3.34).

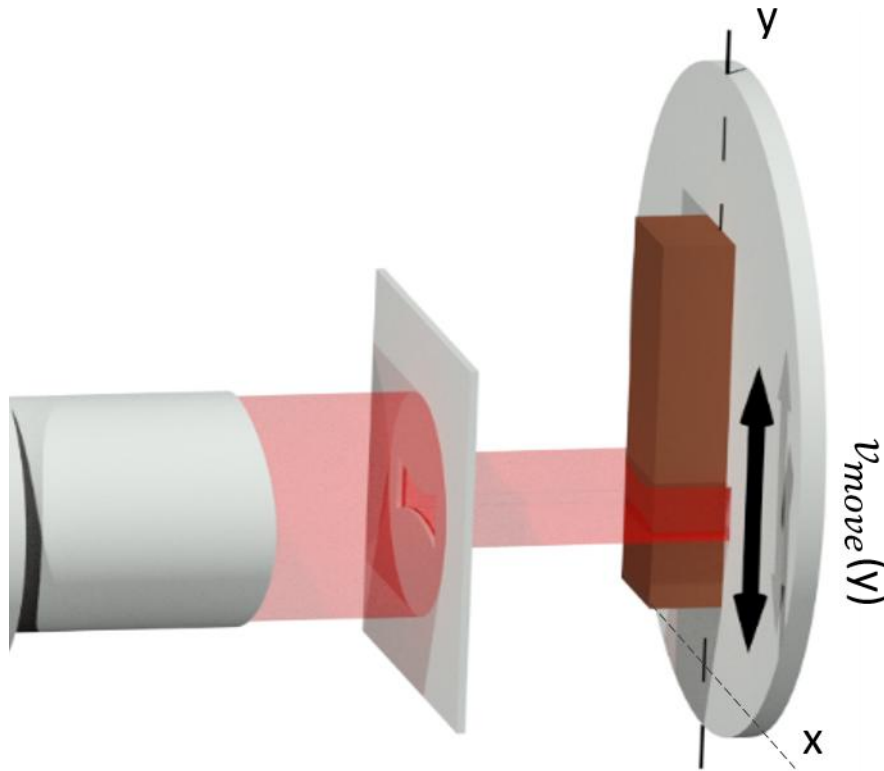


Рисунок 3.34 Схема процесса формирования параболического профиля ионным пучком.

Глубина ионного травления в общем виде может быть записана как (3.27)

$$H(x, y) = N \cdot \int_{a(x)}^{b(x)} v_{etch}(x, y') \cdot \frac{1}{v_{move}(y-y')} dy' \quad (3.27)$$

где $H(x, y)$ – распределение глубины ионного травления, $H(x) = const$ – образующая цилиндра, $H(y)$ – формируемый профиль направляющая цилиндра, $N = const$ – количество проездов через маску, $a(x)$ и $b(x)$ – ширина щели в координате x , в случае симметричной диафрагмы $a(x) = -b(x)$, $v_{etch}(x, y)$ – распределение скорости ионного травления в области диафрагмы, y – направление вдоль которого происходит движение обрабатываемой детали, $v_{move}(y)$ – скорость линейного перемещения образца. Предполагая, что ширина щели много меньше размеров формируемого профиля $H(y)$, можно считать, что профиль диафрагмы определяет форму образующей (вдоль образца), а закон движения – форму направляющей (поперёк образца).

Для этого время травления в каждой координате y_i должно быть пропорционально требуемому отклонению формы поверхности от плоскости в этой точке. То есть, $T(y) \sim$

$H(y)$, при этом скорость движения обратно пропорциональна времени; в этом случае закон движения описывается выражением (3.28):

$$v(y) = \frac{1}{k \cdot H(y) + b} \quad (3.28)$$

Константы k и b определяют минимальную и максимальную скорость перемещения детали позади диафрагмы, глубину формирующегося профиля, как было сказано выше, определяет количество проходов образца позади диафрагмы (N).

Сечение щели с учетом распределения ионного тока по апертуре источника рассчитано таким образом, чтобы в каждой точке позади щели на поверхности образца за одинаковое время производится одинаковое по глубине удаление материала, что обеспечивает равномерный съем материала поперек заготовки, т.е. $H(x) = \text{const}$. Это требование реализуется путём расчёта формы диафрагмы в соответствии с выражением (3.29).

$$H(x) \sim \int_{a(x)}^{b(x)} v_{etch}(x, y) dy = \text{const} \quad (3.29)$$

На рисунке 3.35 представлена схема вычисления профиля обрезавшей ионный пучок щелевой диафрагмы.

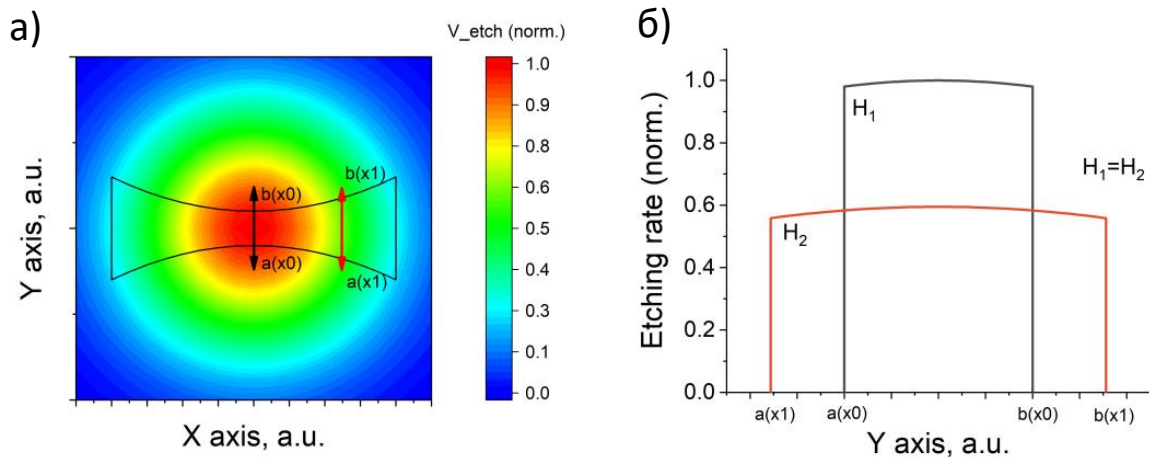


Рисунок 3.35 Схема вычисления профиля обрезавшей пучок щелевой диафрагмы а) распределение скорости ионного травления и профиль диафрагмы; б) Сечения скорости ионного травления по оси y при $x = x_1$ и $x = x_2$.

Для обеспечения равномерного удаления материала по направляющей формируемого цилиндра должно выполняться условие, что для каждого сечения распределения скорости ионного травления по оси u суммарное травление должно быть равно константе, то есть $I_1 = I_2$. Исходя из этого условия выбираются границы интегрирования $a(x)$ и $b(x)$.

Предложенный метод был реализован.

Для реализации закона движения был модернизирован блок управления линейным перемещением столика образца и управляющее приложение. В приложении теперь доступна функция задания частоты управляющих импульсов на шаговом двигателе в зависимости от координаты (закон изменения частоты следования импульсов задается в форме таблицы $[z, v]$). Окно управляющего приложения с загруженным в него законом движения представлено на рисунке 3.36.

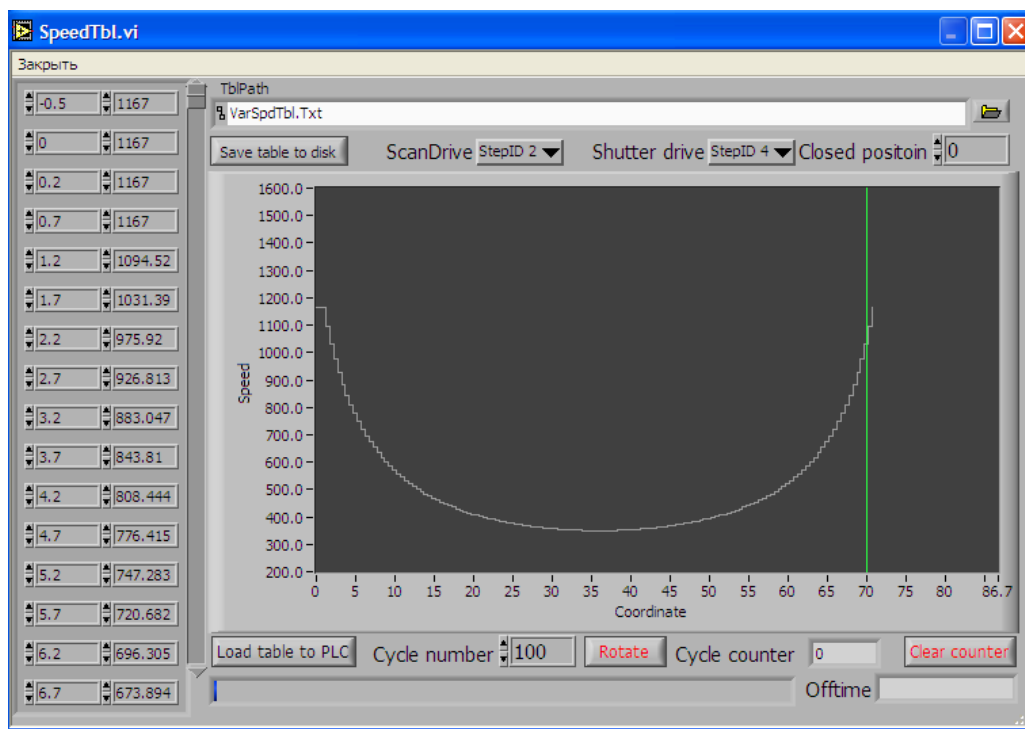


Рисунок 3.36. Окно программы управления линейного транслятора с загруженным распределением скорости перемещения от координаты.

Важным параметром процесса является количество циклов перемещения образца (N) позади формирующей профиль ионного пучка диафрагмы, т.е. необходим контроль глубины формирующегося профиля за один цикл перемещения. Такой контроль производился стандартным методом, пункт 3.1. Отличие в данном случае заключалось в

том, что проверялось 3 сечения (вдоль центральной оси образца, а также на расстоянии 10 мм справа и слева).

На рисунке 3.37 представлены тестовые профили, полученные на пластине из плавленного кварца.

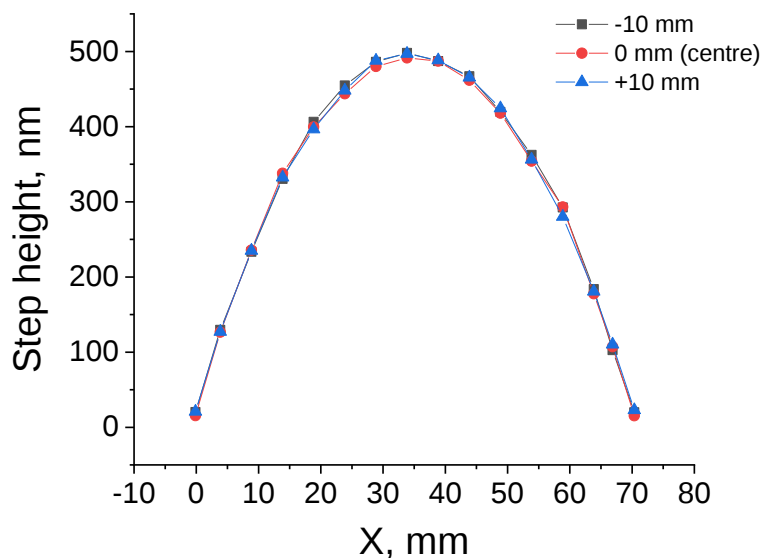


Рисунок 3.37 Распределение глубины травления от координаты (измерение на свидетеле).

Как можно видеть наблюдается хорошее совпадение глубины травления для всех трех положений (0 мм и ± 10 мм). Глубина травления в максимуме за 100 циклов составила порядка 500 нм, что соответствует глубине травления ~ 5 нм за один проход. После калибровки профиля и скорости травления была проведена асферизация подложек зеркал М1 и М2 коллимирующей системы Киркпатрика-Баеза (изготовление плоских заготовок которой описано в п.3.2 Глава 3 и п.4.1 Глава 4). Параметры процесса: $I_{\text{ион}}=70$ мА, $E_{\text{ион}}=1250$ эВ. Полное время процедуры асферизации для обоих образцов составило порядка 4 часов, что соответствовало 214 циклам для подложки зеркала М1 и 230 циклам для М2. Карты поверхности подложек после процедуры асферизации представлены на рисунке 2.34.

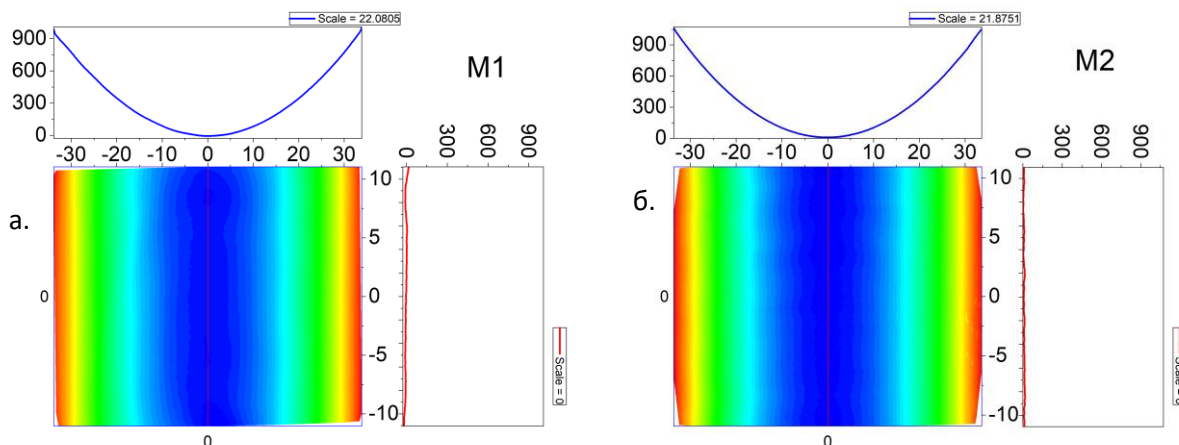


Рисунок 3.38 Карта поверхностей подложек зеркал M1 (а) и M2 (б) коллимирующей КБ-системы после асферизации.

Как можно видеть на обоих образцах удалось сформировать параболический профиль. Карты ошибок формы поверхности, представленные на рисунке 3.39 получаются из карт, представленных на рисунке 3.38, путем вычитая расчетных парабол.

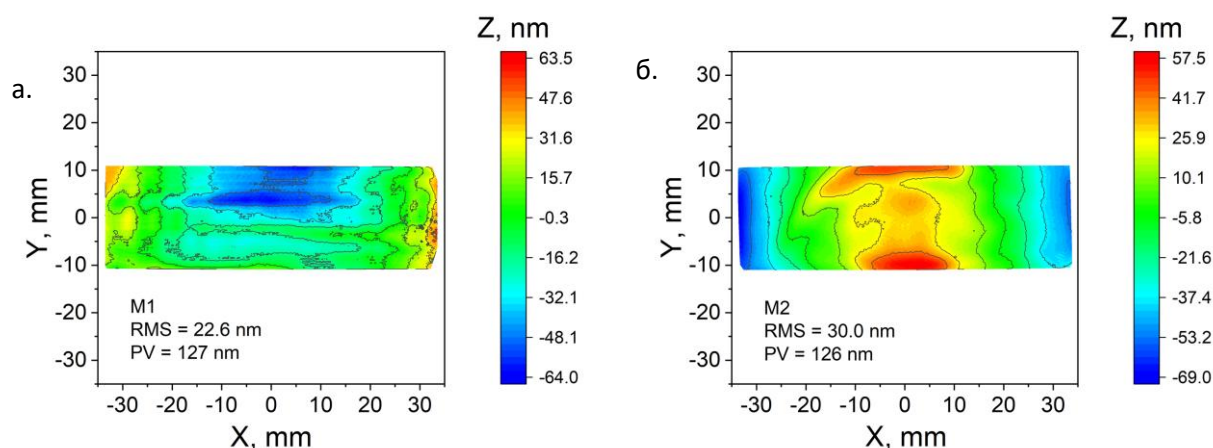


Рисунок 3.39. Карта отклонения формы поверхностей подложек зеркал M1 (а) и M2 (б) коллимирующей КБ-системы от расчетных параболических цилиндров после асферизации.

Для финишной коррекции формы поверхности необходимо проведение коррекции локальных ошибок формы по методике, описанной в Главе 4.

Таким образом, предложен универсальный механизм формирования рентгенооптических элементов скользящего падения, позволяющий изготавливать цилиндрические поверхности с образующей произвольной формы из плоских заготовок и заготовок в форме кругового цилиндра.

С помощью данного метода была проведена асферизация подложек для системы Киркпатрика-Баеза для станции 1-1 «Микрофокус», строящегося синхротрона 4го поколения СКИФ (Новосибирск, Россия) [117], а также подложек для зеркал рефлектометра Черни-Тёрнера [118]

Заключение по 3й главе

1. Разработан алгоритм осесимметричной обработки поверхности детали, исключающий неоднозначность ионного травления ~~в области~~ вблизи оси вращения детали. Метод позволяет проводить асферизацию, осесимметричную коррекцию формы поверхности и ионную полировку обеспечивая точность на уровне 3 нм по параметру СКО и шероховатость на уровне 0.15 нм в диапазоне пространственных частот $[4.9 \cdot 10^{-2} - 6.3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1}]$.
2. Разработан метод осесимметричной коррекции формы для оптических элементов произвольной геометрии. Метод включает поиск оптимального центра вращения и профиля травления с точки зрения минимизации целевой функции. Представленный метод применим для формирования внеосевых асферических элементов.
3. Разработан алгоритм вычисления закона движения обрабатываемой поверхности и профиля обрезающей ионный пучок диафрагмы, необходимых для формирования оптических поверхностей, описываемых полиномами Цернике.
4. Разработан метод формирования высокоточных тороидальных оптических поверхностей. Продемонстрирована точность на уровне 0.3% при глубине травления 31 мкм. Получена оптическая поверхность с точностью формы 12 нм по параметру СКО.
5. Создана методика формирования цилиндрических поверхностей с произвольной образующей (парабола, эллипс и т.д.) размером больше размеров ионного пучка. Метод использован при изготовлении зеркал КБ-системы.

Глава 4. Методы ионно-пучкового формообразования малоразмерным фокусирующим ионным источником

Наиболее сложной, трудоемкой и время затратной задачей в области прецизионной обработки (рентгено) оптических поверхностей является коррекция локальных ошибок формы с использованием малоразмерного ионного пучка. Для проведения процесса требуется вычислить распределение времени экспозиции пучка на основе анализа карт отклонений формы поверхности и характеристик самого ионного пучка.

4.1. Теоретическая модель травления

Процесс удаления материала ионным пучком можно описать с помощью функции BRF (x_i, y_i, x, y), которая показывает, скорость удаления материала в точке (x, y), когда центр пучка находится в позиции (x_i, y_i). При этом общее количество удалённого материала $R(x, y)$ в каждой точке складывается из вкладов всех положений пучка, которые влияют на эту точку (включая "хвосты" распределения функции BRF). Удаление материала $R(x, y)$ в точке (x, y) описывается свёрткой функции удаления BRF (x', y', x, y) и времени экспозиции $T(x', y')$ 4.1:

$$R(x, y) = \iint \text{BRF}(x', y', x, y) \cdot T(x', y') \, dx' \, dy' \quad (4.1)$$

Кратер одиночного ионного травления может быть описан в случае если $T(x', y') = \delta(x - x'; y - y')$. Таким образом, из одиночного травления может быть определена функция BRF (x', y', x, y).

Однако, исходная карта отклонения формы поверхности от идеальной измеряется на интерферометре, и записывается как дискретные значения высоты в узлах регулярной сетки x, y . В таком случае свёртка может быть представлена в следующем дискретном виде 4.2:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^N \text{BRF}(x_i, y_i, x, y) \cdot T(x_i, y_i) \quad (4.2)$$

Где суммирование ведётся по всем возможным положениям центра пучка i , при которых пучок воздействует на поверхность. Изменение поверхности в ходе ионного травления может быть записано 4.3:

$$\tilde{S}(x, y) = S(x, y) - R(x, y) = S(x, y) - \sum_{i=1}^N \text{BRF}(x_i, y_i, x, y) \cdot T(x_i, y_i) \quad (4.3)$$

где S – карта отклонений исходной формы поверхности, R – распределение глубины удаляемого с поверхности материала в ходе ионного травления, $\tilde{S}(x, y)$ – карта отклонения формы поверхности после ионной обработки.

Рассмотрим получение поверхности, с ошибкой формы равной 0 ($CKO=0$), для этого должно выполняться условие

$$R(x, y) = S(x, y) \quad (4.4)$$

Данное условие схематически может быть показано следующим образом (рисунок 4.1):

Схематическое представление ионного травления:

f_{00}	f_{01}	f_{02}
f_{10}	f_{11}	f_{12}
f_{20}	f_{21}	f_{22}

*

0	0	0	0	0
0	T_{00}	T_{01}	T_{02}	0
0	T_{10}	T_{11}	T_{12}	0
0	T_{20}	T_{21}	T_{22}	0
0	0	0	0	0

=

s_{00}	s_{01}	s_{02}
s_{10}	s_{11}	s_{12}
s_{20}	s_{21}	s_{22}

Рисунок 4.1 Схематичное представление ионного травления: S - карта отклонений исходной формы поверхности; BRF – распределение скорости удаления материала ионным пучком; T – время экспозиции ионного пучка.

Пусть: Функция удаления материала задана матрицей BRF, каждый элемент которой определяет скорость удаления материала в данной точке ионного пучка (f_{ij}). Матрицей T задано время ионного травления в соответствующих положениях, значение $T_{ij}=0$, означает, что травление в данной точке происходит только при травлении хвостами ионных пучков, из соседних точек, однако, своим центром пучок в данной точке не находится. Матрица S – карта высот исходной поверхности.

Тогда условие (4.4) может быть записано в виде системы линейных алгебраических уравнений

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^N f_{kl} * T \quad (4.5)$$

Которая может быть представлена в виде матричного умножения (рисунок 4.2)

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{A}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \vec{T}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \vec{S}
 \end{array}$$

Рисунок 4.2 Схематичное представление ионно-пучкового травления. Матрица A построена из BRF и позволяет связать вектор T - задающий время экспозиции ионного пучка и вектор S - карту отклонения формы исходной поверхности.

В такой записи хорошо видны некоторые особенности, а именно: в случае, когда количество доступных положений пучка совпадает с количеством точек, которыми задаётся поверхность, ядро свёртки может быть представлено в виде квадратной матрицы A (рисунок 4.2), размерностью N , где N – количество значений на поверхности, характеристики которой необходимо улучшить.

Тогда процедура ионного травления может быть записана в виде $\vec{S} = A * \vec{T}$, где $\vec{S}$ – вектор составленный из значений отклонения поверхности, A – матрица, задающая ядро свёртки, $\vec{T}$ – вектор, составленный из значений времени травления во всех доступных точках. При условии невырожденности этой квадратной матрицы ($\det A \neq 0$) существует обратная к ней (A^{-1}), применение которой к вектору, построенному из значений входной поверхности, $A^{-1} * \vec{S} = A^{-1} * A * \vec{T} = \vec{T}$, даст нам вектор времён T , травление в соответствии с которым приводит к снижению отклонений формы поверхности до 0. Таким образом, зная функцию удаления материала (матрицу BRF) и карту высот исходной поверхности (матрица S) необходимо найти время нахождения пучка в каждой точке поверхности (матрицу T). В этом случае будет получено точное решение. Т.е. для всех S и BRF, заданных матричным представлением, существует такая матрица T для которой ($CKO = 0$).

Но такое решение не является подходящим, так как зачастую предполагает удаление большого объёма материала, и, как следствие, большое время травления. Чтобы продемонстрировать это, приведём расчёт для модельной поверхности, заданной в виде параболоида вращения $z = x^2 + y^2$. Пусть координаты x и y меняются в интервале $[-10$

,10] с шагом 1. Модельный пучок зададим следующим сечением: {0,1,3,4,3,1,0}. По результатам расчёта была получена ровная поверхность, но глубина удаления материала составила $4 \cdot 10^8$ единиц при условии, что PV модельной поверхности был всего $2 \cdot 10^2$ единиц. Кроме того, такое решение не устойчиво и может сильно меняться при малом изменении исходных данных. Таким образом нашей задачей будет не поиск точного решения, а поиск решения, характеристики которого удовлетворят нашим требованиям. Кроме того, введём ограничение на суммарное время обработки поверхности, чтобы можно было получить наилучший результат за минимальное время работы установки.

4.2. Приближенное решение

Для расчёта карты времен травления был разработан алгоритм коррекции локальных ошибок формы поверхности, основанный на матричном представлении задачи. Данный метод решает задачу о нахождении оптимального времени травления для всех возможных положений ионного пучка относительно поверхности. Коррекция формы в соответствии с рассчитанным временем травления должна приводить к улучшению поверхности.

Будем оценивать изменение качества подложки, основываясь на критерии Марешаля, то есть среднеквадратичное отклонение (4.6) получившейся в результате ионного травления поверхности $\tilde{S}(x,y)$ должно быть ниже необходимого уровня.

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{S}(x_i, y_i) - \bar{\tilde{S}})^2} \leq \lambda/14 \quad (4.6)$$

где N – количество точек поверхности, $\tilde{S}(x_i, y_i)$ – значение профиля поверхности после ионного травления в i -ой точке, $\bar{\tilde{S}}$ – среднее значение поверхности после ионного травления. Опишем подробнее процесс травления: За время T ионный пучок, находящийся в координате (x_0, y_0) вытравливает профиль $R(x_0 - x, y_0 - y) = BRF(x, y) * T(x_0, y_0)$. Таким образом, изменение формы поверхности после травления в N точках запишется следующим образом (4.7)

$$\tilde{S}(x_i, y_i) = S(x_i, y_i) - R(x_i, y_i) = S(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^N BRF(x_j, y_j, x_i, y_i) * T(x_j, y_j) \quad (4.7)$$

где индекс j указывает координату нахождения центра пучка, j принимает все доступные положения пучка, пронумерованные от 1 до N (считаем, что шаг между соседними доступными положениями пучка не меньше, чем шаг сетки карты). $\tilde{S}$ – значение поверхности после травления, S – значение поверхности до травления. Можно видеть, что

в такой записи учитывается удаление материала за счёт всех пучков, распределение скорости травления которых задевает рассматриваемую точку. Среднее значение ошибки после травления также изменится (4.8)

$$\bar{\tilde{S}}(x, y) = \bar{S} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N BRF(x_j, y_j, x_i, y_i) * T(x_j, y_j) \quad (4.8)$$

Распишем формулу для СКО, учитывая, что было произведено травление в нескольких точках. И выразим явно зависимость среднеквадратического отклонения от $T(x, y)$ (4.9),

$$\begin{aligned} CKO &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(x_i, y_i)_{new} - \bar{S}_{new})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[S(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^N \{BRF(x_j, y_j, x_i, y_i) * T(x_j, y_j)\} - \bar{S} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \{BRF(x_l, y_l, x_k, y_k) * T(x_l, y_l)\} \right]^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[S(x_i, y_i) - \bar{S} - \sum_{j=1}^N T(x_j, y_j) * \left(BRF(x_j, y_j, x_i, y_i) + \sum_{k=1}^N BRF(x_j, y_j, x_k, y_k) \right) \right]^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [a_i * T(x_i, y_i)^2 + b_{ij} * T(x_i, y_i) * T(x_j, y_j) + c_i * T(x_i, y_i) + d]} \quad (4.9) \end{aligned}$$

где $a_i, b_{ij}, c_i, d = \text{const}$ и не зависят от T . Таким образом, наша задача заключается в нахождении всех таких T_i , чтобы выполнялся критерий Марешаля, и, чтобы выполнялось условие $T_i > 0$. Можно видеть, что это задача оптимизации в переменных T_i , где СКО будет являться функцией потерь. Функция потерь определена и дифференцируема для любых значений T_i . Таким образом можно использовать метод градиентного спуска, который позволяет достичь минимума. Реализация градиентного спуска выглядит следующим образом: начальная точка соответствует времени $T_0(x_i, y_i) = 0$ для любого $i \in [1...N]$, в ней находится градиент $\nabla CKO(T(x_i, y_i))$ и совершается шаг α , $T_1(x_i, y_i) = T_0(x_i, y_i) - \alpha * \nabla CKO(T_0(x_i, y_i))$. Кроме того, реализовано виртуальное расширение карты заготовки, что позволяет производить травление, когда центр пучка находится за границей обрабатываемой детали. Это позволяет производить более эффективную обработку краёв.

Для оценки работоспособности метода рассмотрим обработку тестовой модельной поверхности ионными пучками различных латеральных размеров. Пусть обрабатываемая поверхность задана уравнением 4.10.

$$F(x,y)=A \cdot \sin(kx) \cdot \sin(ky) \quad (4.10)$$

Для данной поверхности ширина на полувысоте неоднородности может быть определена как $D = \left(\frac{\pi}{k}\right)$

И пусть распределение скорости удаления материала в пределах ионного пучка описывается нормальным распределением в виде 4.11

$$BRF(x, y) = \exp\left(\frac{-R^2 \cdot \ln(0.5)}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}\right) \quad (4.11)$$

где d – ширина пучка на полувысоте. В таком случае G - отношение d к размеру неоднородности (D) соответствует формуле 4.12

$$G = \frac{d}{D} = \frac{d}{\frac{\pi}{k}} \quad (4.12)$$

Рассмотрим эффективность ионно-пучковой обработки при различных значениях параметра G . На рисунке 4.3 представлена моделируемая поверхность с $k = 0.1$

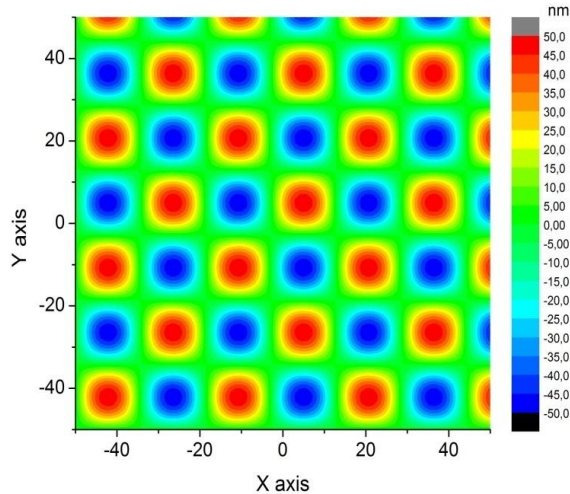


Рисунок 4.3. Тестовая поверхность, размерность 100х100 точек. $PV = 100$ нм,
СКО=24.5 нм.

Типичная зависимость спадания расчетного СКО для тестовой поверхности от времени “травления” представлена на рисунке 4.4.

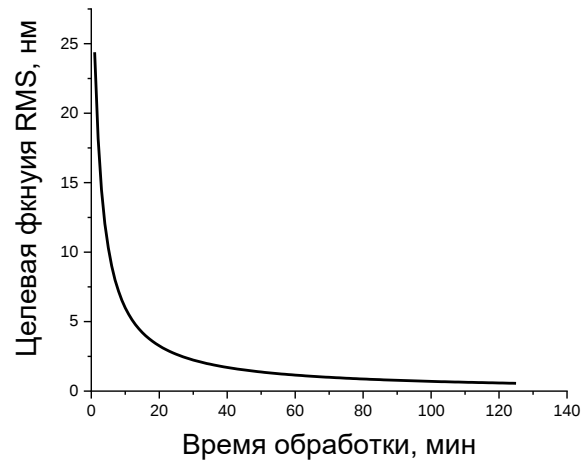


Рисунок 4.4. Расчетная зависимость СКО результирующей поверхности от времени “травления” (~ 200000 шагов спуска).

Ограничим полное время обработки $T = 120$ минут. В сравнительном эксперименте рассматривались пучки гауссовой формы с соотношением $G = 1, 0.5$ и 0.25 (рисунок 4.3). Результаты моделирования приведены в таблице 4.1. Пример модели поверхности после ионно-пучковой коррекции локальных ошибок формы с параметром $G = 0.25$ представлен на рисунке 4.5.

Таблица 4.1. Результаты моделирования.

G	СКО
1	3.18
0.5	0.63
0.25	0.6

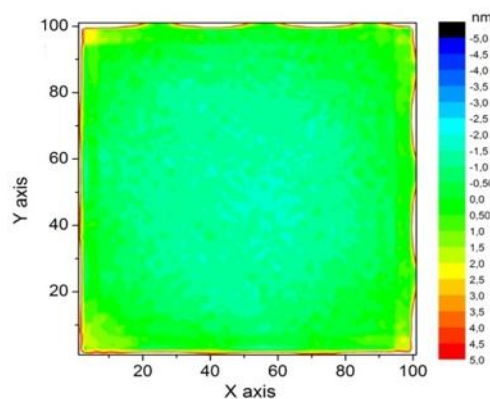


Рисунок 4.5 Результат обработки тестовой поверхности “ионным пучком” $G=0.25$.

Как можно видеть, результирующая поверхность, получаемая при реализации алгоритма, не является модификацией исходной поверхности со сниженной амплитудой, что наблюдается в методе [87] пункт 1.4.3. Такой подход при обработке реальной детали позволяет избавиться от детерминированной ошибки на результирующей поверхности. При решении задачи минимизации ошибок формы поверхности данный подход не ставит в прямую зависимость время травления в точке с высотой отклонения формы поверхности от идеальной в данной точке, как следствие на результирующей поверхности нет детерминированной ошибки с характерными масштабами размера ионного пучка. Оценка чувствительности метода к латеральному размеру неоднородности показана на рисунке 4.6. В данном случае рассматривалось, как пучок некоторого размера d уменьшает амплитуду неоднородности латерального размера D за одинаковое время.

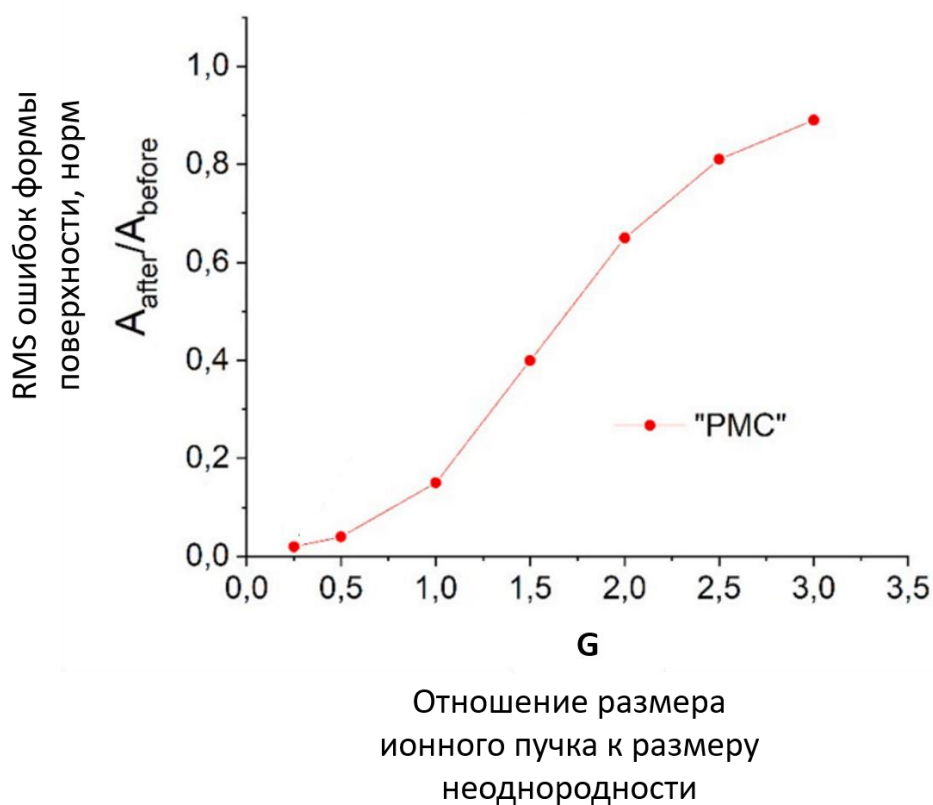


Рисунок 4.6. Чувствительность метода к латеральному размеру неоднородности.

Как можно видеть, предложенный метод позволяет заметно снижать амплитуду неоднородностей латерального размера вдвое меньше размера ионного пучка. Таким образом, зная частотные характеристики исходной поверхности можно выбирать пучок для наилучшей обработки.

4.3. Эксперимент

В качестве иллюстрации метода рассмотрим изготовление подложек для КБ системы (пункт 3.2 диссертации). На рисунке 4.7 представлена карта ошибок формы поверхности после ионной асферизации.

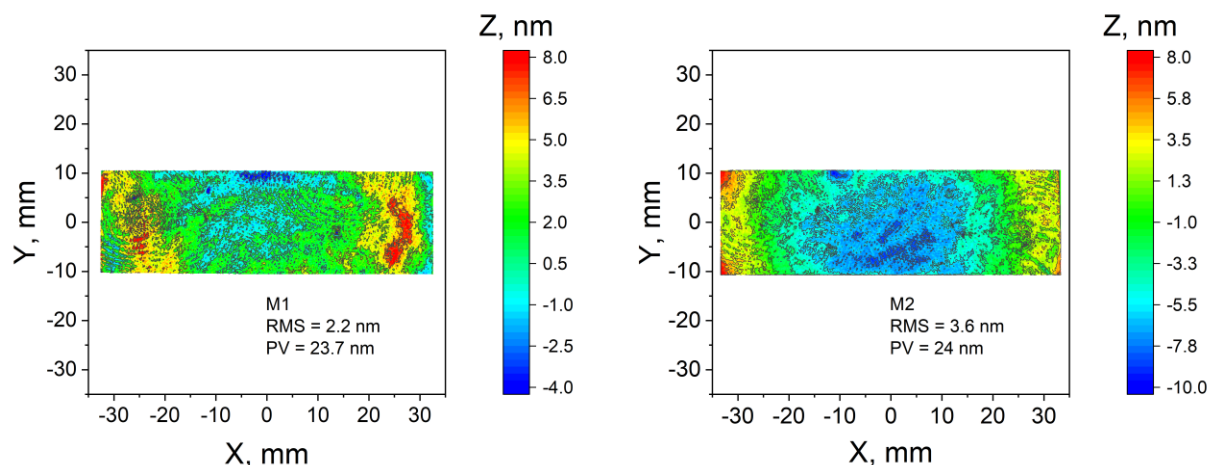


Рисунок 4.7. Карты ошибок формы поверхности образцов после осесимметричной обработки широкоапертурным ионным источником.

По измеренным исходным картам ошибок формы поверхности была рассчитана обработка источником КЛАН-12М, пучком диаметром 2.1 мм. Для каждого образца было проведено 3 последовательных травления с промежуточным контролем формы поверхности. На рисунке 4.8 представлены отклонения поверхности от плоскости после завершения планаризации.

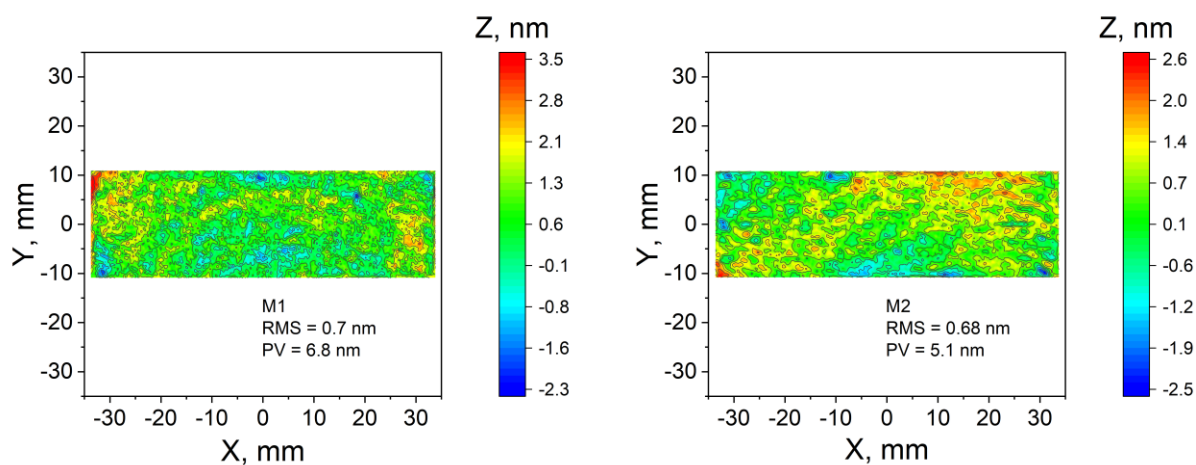


Рисунок 4.8. Карты ошибок формы поверхности образцов после коррекции локальных ошибок формы.

Как можно видеть для обоих образцов удалось получить субнанометровую точность формы поверхности: СКО М1 = 0.7 нм, СКО М2 = 0.68 нм, что демонстрирует возможности развитой методики формообразования (рентгено) оптической поверхности.

Данная методика позволяет изготавливать не только плоские образцы.

Например, с помощью представленного метода была изготовлена сферическая подложка для первичного зеркала двухзеркального объектива рентгеновского микроскопа на длину волны 3.4 нм (т.н. “окно прозрачности воды”) [119] из плавленого кварца (диаметр 100 мм, радиус кривизны 137.5 мм, числовая апертура 0.36). «Чистое» время обработки (без учёта переездов) составило 2ч 15 мин.

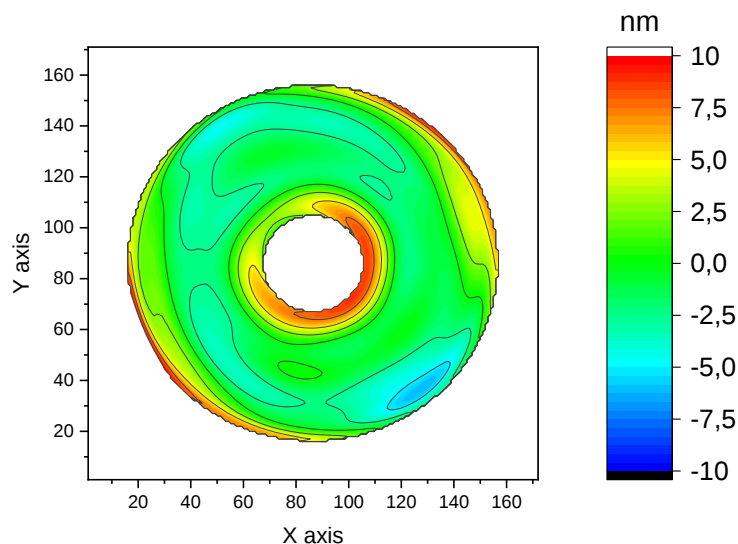


Рисунок 4.9. Карта поверхности до травления СКО = 3.2 нм. PV = 19.6 нм.

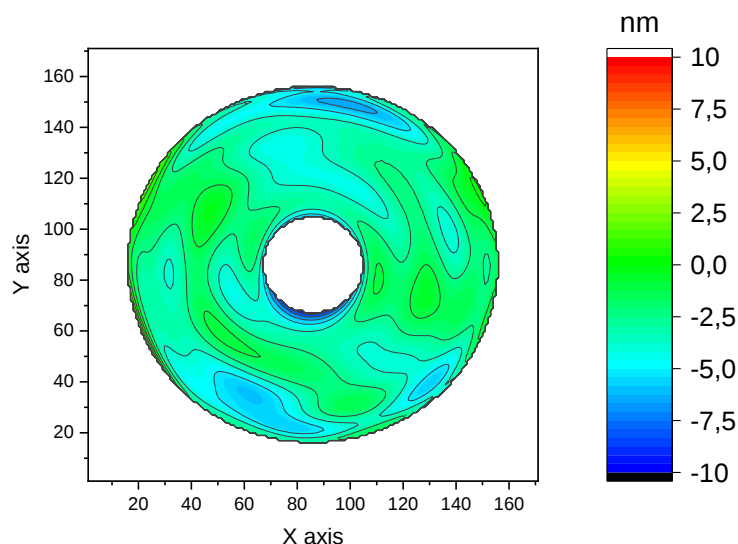


Рисунок 4.10 Карта поверхности после травления. (эксперимент) СКО = 0.9 нм. PV = 8 нм.

Развитая в диссертации методика была применена для финишной коррекции формы различных рентгенооптических элементов, что позволило достичь субнанометровой точности.

Таким образом, в рамках работы показано, что матричное представление позволяет для любых S и BRF найти точное решение задачи коррекции формы поверхности малоразмерным ионным пучком.

Предложен и реализован алгоритм решения задачи минимизации ошибок формы поверхности при коррекции малоразмерным ионным пучком. Математически показано, что модель позволяет получить сколь угодно гладкую поверхность, алгоритм же является компромиссом между качеством поверхности и целесообразным временем расчета и, главное, временем травления.

При решении задачи минимизации ошибок формы поверхности данный подход не ставит в прямую зависимость время травления в точке с высотой отклонения формы поверхности от идеальной в данной точке, как следствие на результирующей поверхности нет детерминированной ошибки с характерными масштабами размера ионного пучка.

Решение может быть найдено для любой пары пучок – поверхность, таким образом, можно задать произвольную модельную поверхность и при деконволюции ее с имеющейся (экспериментальной) функцией BRF получить данную форму с любой

наперед заданной точностью. Т.е. методика применима не только для коррекции по карте ошибок формы, полученной с помощью интерферометра, но и для формирования поверхностей произвольной формы.

4.4. Формирование оптических элементов произвольной формы малоразмерным сильноточным ионным пучком

Рассмотрим задачу о формировании поверхности произвольной формы, необходимой для реализации рентгенооптической схемы, собирающей излучение из фокуса F1 в фокус F2, представленной на рисунке 4.11. В данной схеме коллекторное зеркало должно представлять собой внеосевой эллипсоид, где F1 и F2 – фокусы, O – точка пересечения образующей эллипсоида и оптической оси, O1 – центр зеркала. Из-за геометрии задачи (существенно внеосевое падение излучения) для обеспечения расчетного размера пятна фокусировки ЭУФ излучения необходимо скомпенсировать aberrации волнового фронта.

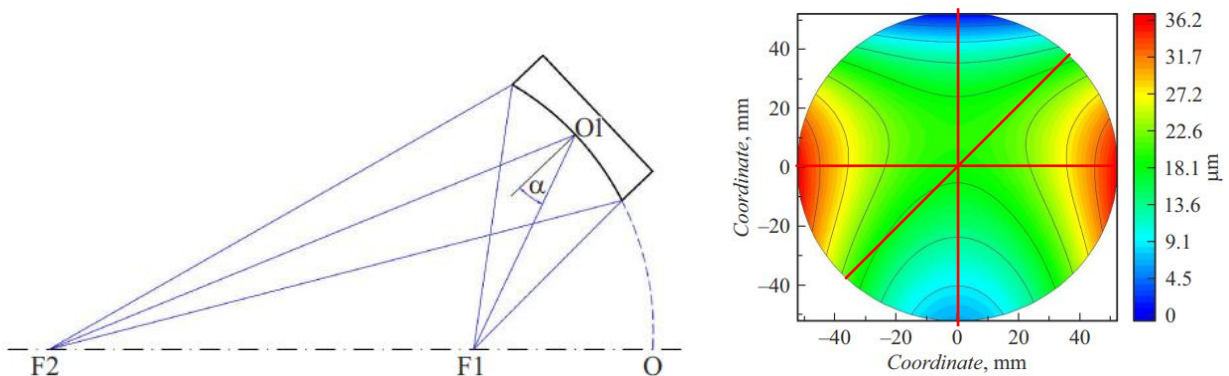


Рисунок 4.11 Оптическая схема внеосевого коллектора излучения (а) и отклонение расчётной поверхности коллектора от ближайшей сферы(б).

Расчет профиля асферизации, обеспечивающего компенсацию обозначенных выше aberrаций, производился в программе Zemax [120]. На рисунке 4.11б представлена карта отклонения формы поверхности требуемого внеосевого эллипсоида от ближайшей сферы. Как можно видеть, для реализации расчетных размеров пятна фокусировки ЭУФ излучения профиль асферизации коллекторного зеркала должен быть существенно неосесимметричным с размахом высот $PV = 36.3$ мкм. Данная поверхность может быть сформирована различными методами.

С помощью разработанного в п.4.1 алгоритма было рассчитано время формирования данного профиля поверхности малоразмерным ионным источником КЛАН-12М (ширина

ионного пучка на полувысоте ~ 2.5 mm и ток ионов 1 mA). Расчет показал, что “чистое” время обработки в данном случае составит более 1000 часов.

Другой вариант – это формирование данной рентгенооптической поверхности по схеме, описанной в п. 3.3. Главы 3. Данная поверхность может быть представлена в виде суммы поверхностей, представленных на рисунке 4.12.

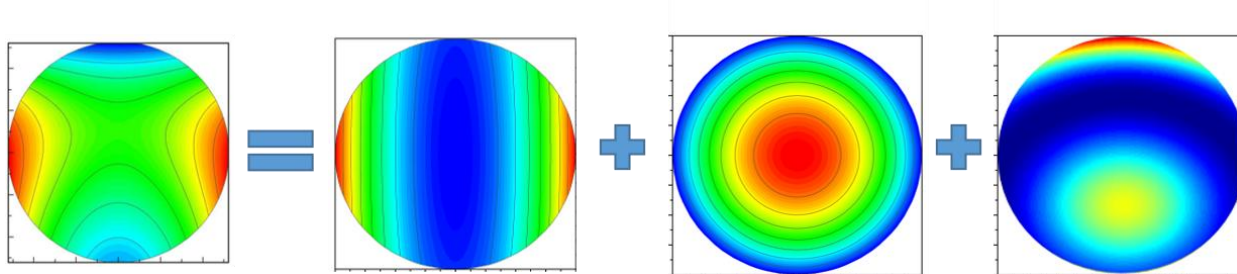


Рисунок 4.12. Требуемая асферика может быть представлена как сумма трёх компонент, две из которых – осесимметричные, а эллиптический параболоид может быть сформирован с переменной скоростью вращения.

Таким образом, для формирования поверхности потребуется три комплекта масок, обработка через две из которых будет производиться с равномерной скоростью вращения, а через оставшуюся – по закону движения представленному на рисунке 3.24 глава 3. Однако, данная процедура достаточно трудоемкая, необходимо провести изготовление и тестирование трех масок с контролем формирующегося профиля для осесимметричных частей только вдоль радиуса, а для движения с переменной скоростью по крайней мере в нескольких ключевых сечениях, обозначенных красными линиями на рисунке 4.11 б.

Для формирования рассчитанной поверхности целесообразнее использовать малоразмерный сильноточный ионный пучок (источник КЛАН-53М с фокусирующей ИОС, см. Главу 2 п. 2.2.3). По измеренным в главе 2 распределениям скорости ионного травления (для ионного пучка диаметром 8 мм и $I_{\text{ион}} = 20$ mA) был произведен расчет времени травления, которое составило всего 21 час. Карта распределения времени травления представлена на рисунке 4.13

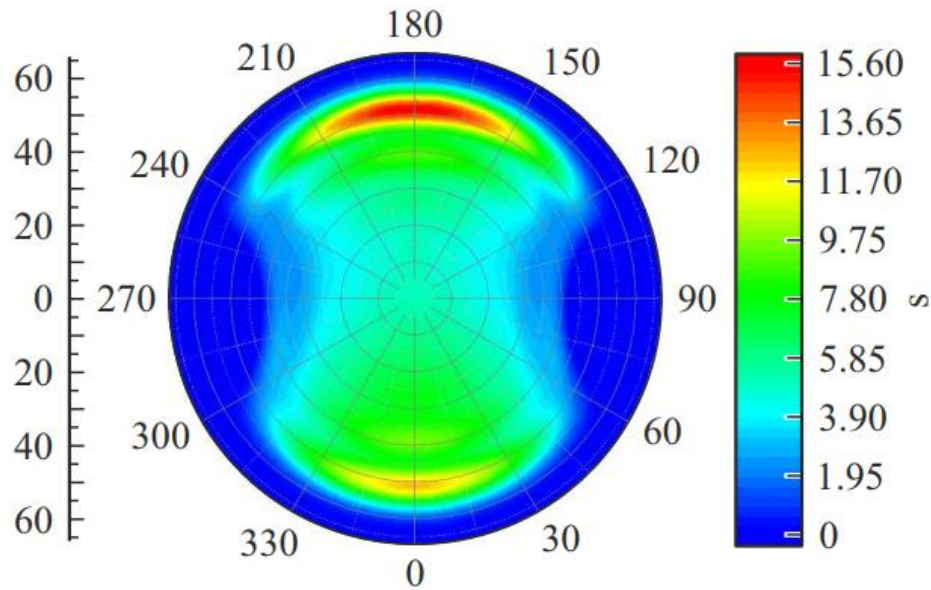


Рисунок 4.13 Карта времени экспозиции ионного пучка КЛАН-53М, найденная для формирования рассчитанной асферики

Ионно-пучковая асферизация

Асферизации подвергалась сферическая заготовка из плавленого кварца с размерами: $\varnothing 105$ мм, радиусом $R = -672.9$ мм и толщиной 25 мм. Суммарное время травления с перемещением источника относительно детали составило 30 часов. После процедуры асферизации была проведена аттестация волновых aberrаций эллипсоида и размера пятна фокусировки.

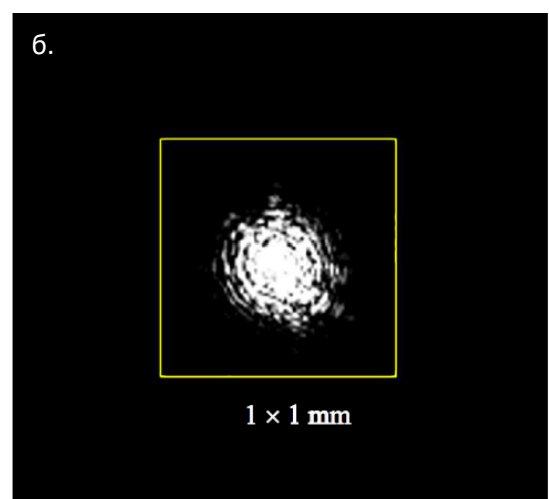
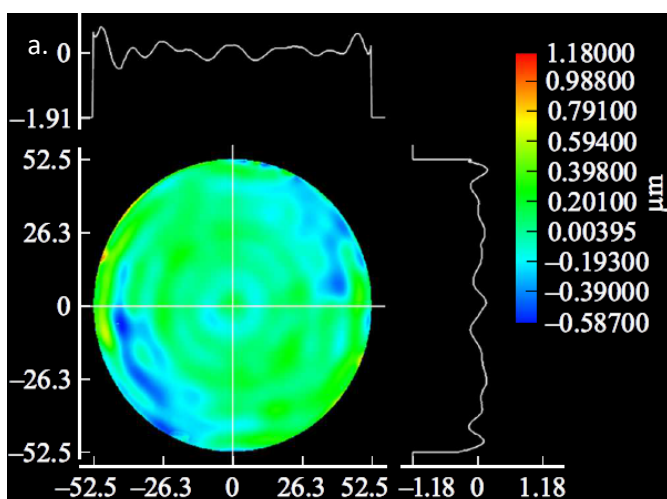


Рисунок 4.14 Карта волновых aberrаций зеркала-коллектора (а) и пятно фокусировки (б) после асферизации

Волновые aberrации, карта которых представлена на рисунке 4.14а, измерялись по схеме, опубликованной в [117]. Как можно видеть (рисунок 4.14б) полуширина пятна фокусировки на полувывоте составила 300 мкм при точечном источнике [113] в первом фокусе. В данном случае дальнейшее улучшение формы поверхности не требовалось, однако, если необходимо провести финишную коррекцию формы, обеспечивающую точность по параметру СКО лучше 1 нм, то это может быть реализовано с привлечением малоразмерного слаботоочного ионного пучка (источник КЛАН-12М). Т.е. последовательное уменьшение размера ионного пучка и тока ионов позволяет последовательно снижать высоту ошибок формы и повышать доступные к обработке пространственные частоты.

Таким образом, в работе предложен и реализован ионно-пучковый метод изготовления асферических оптических элементов произвольной формы с наперед заданной точностью. С помощью методики изготовлен внеосевой коллектор с размахом высот профиля поверхности более 30 мкм.

Работоспособность разработанного алгоритма была опробована при коррекции формы различных (рентгено) оптических поверхностей. В частности, была продемонстрирована возможность формирования (рентгено) оптической поверхности свободной формы (отклонение от ближайшей сферы 36 мкм)

4.5. Контурограф

При проведении ионно-пучковой коррекции формы оптических поверхностей необходимо обеспечивать точное позиционирование обрабатываемой поверхности относительно ионного пучка. Однако существует проблема точной привязки координат карты поверхности к координатам на заготовке, что связано с ошибками при ее изготовлении (несоосность заготовки и оптической поверхности, неперпендикулярность ее граней и т.п.). Поскольку оптическая поверхность измеряется интерферометрическими методами, то в случае наличия подобного рода ошибок, необходимо иметь возможность точно соотнести расположение измеряемой поверхности относительно краёв заготовки. Таким образом, для достижения высокой точности обработки необходима юстировка источника установки ионно-пучковой коррекции относительно оптической поверхности, так как малые неточности позиционирования ионного пучка приводят к ошибкам при ее обработке.

Влияние систематических ошибок позиционирования при ионно-пучковой коррекции формы.

Рассмотрим влияние систематической ошибки при позиционировании обрабатываемой детали относительно начала координат установки ионно-пучкового травления. Пусть карта ошибок формы поверхности представляет собой гиперболический параболоид, заданный на круге диаметром 100 мм, амплитуда рельефа $PV = 2$ мкм, СКО $= 0.4$ мкм (рисунок 4.15а), а карта распределения скорости травления задаётся нормальным распределением с $FWHM = 20$ мм (рисунок 4.15б). Допустим, что систематическая ошибка позиционирования составляет $0.25 FWHM$, на рисунке 4.15а) схематично отмечены положения ожидаемого положения ионного пучка (окружность) и произведённого из-за ошибки позиционирования травления (крестик).

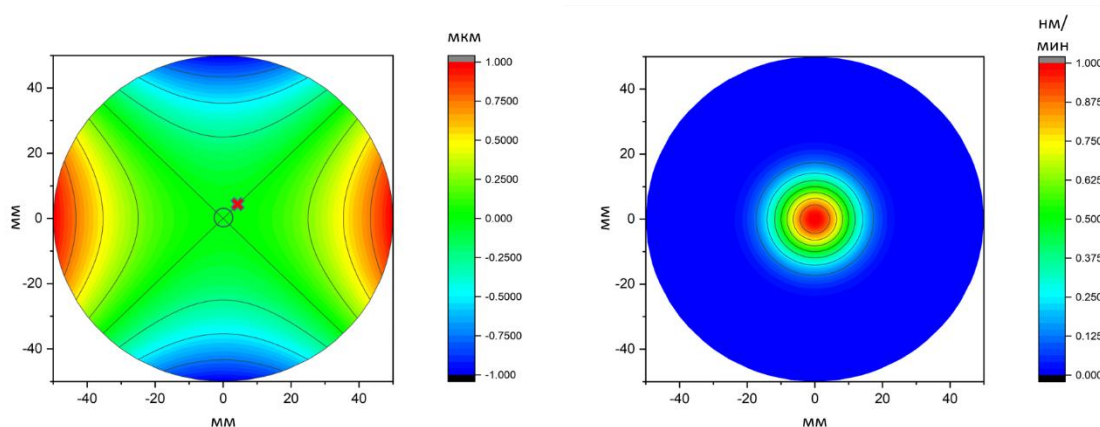


Рисунок 4.15 Карты а) требуемого рельефа травления. $PV = 2$ мкм, СКО $= 0.4$ мкм; б) распределения скорости травления. $FWHM = 20$ мм

В процессе моделирования ограничим полное время обработки поверхности за итерацию 2 часами, а распределение времени экспозиции зададим на равномерной сетке с дискретизацией 2.5 мм.

Было проведено 5 итераций моделирования ионного травления с систематической ошибкой позиционирования $0.25 FWHM$. Для каждой итерации карта времени травления рассчитывалась в предположении идеального позиционирования, тогда как расчёт рельефа поверхности после обработки учитывал смещение. Из-за ошибки позиционирования на поверхности развивается рельеф, представленный на рисунке 4.16а, с характерными размерами, $FWHM = 14.7$ мм $\approx 0.7 FWHM$ пучка; $A = 0.3$ мкм $\approx 15\% PV$

исходной поверхности. Кроме того, была получена зависимость, предсказываемого и полученного из-за сдвига, значения целевой функции (СКО) от номера итерации. Данная зависимость показывает, что предсказываемое значение СКО начинает увеличиваться, начиная с 3 итерации, что может быть связано с увеличением пространственной частоты формируемого рельефа, для устранения которого требуется большее время полной обработки.

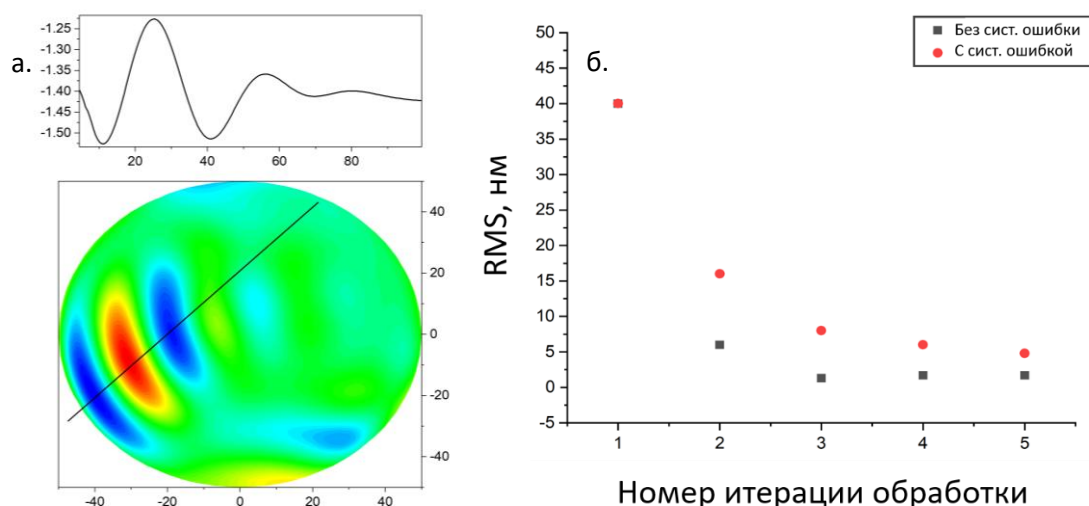


Рисунок 4.16: а) Смоделированная карта поверхности после 5 итераций травления. СКО = 48 нм; б) зависимость изменение СКО рассчитанное без сдвига и со сдвигом от номера итерации

Для точного позиционирования обрабатываемой заготовки в установке ионно-пучковой коррекции был разработан оптический контурограф на основе безмасочного литографа прямого рисования [108], с помощью которого производится определение точных координат границ образца перед обработкой ионным пучком. Таким образом, задача контурографа привязать координаты видимой области заготовки к ее физическим габаритам.

Описание прибора

Оптический контурограф сканирует лазерным лучом по поверхности образца, и ищет положение края его отражающей поверхности. Оптическая поверхность отражает свет, в то время как фаски, обрамляющие оптическую поверхность, имеют резкую границу и существенно отличающийся угол наклона, что отклоняет отраженный луч в сторону от основного пучка. Используя этот факт становится возможным детектирование края видимой области оптической поверхности.

Таким образом, основной принцип работы контурографа основан на регистрации отраженного от поверхности образца лазерного луча. При сканировании луч, отраженный от полированной поверхности, попадает в регистрирующую систему, тогда как излучение от фасок отклоняется. За счёт малого пятна фокусировки (диаметром до 10 мкм) можно добиться точного определения края оптической поверхности. Перемещение образца осуществляется моторизованными линейными трансляторами по осям X (100 мм) и Y (200 мм) с шагом 2.5 мкм, образующими координатный стол, с дополнительной осью Z для фокусировки. Программное обеспечение анализирует интенсивность отраженного сигнала и определяет положение границы оптической поверхности, формируя её контур как последовательность координат, полученных при сканировании. Оптическая схема и фотография прибора представлены на рисунке 4.17.

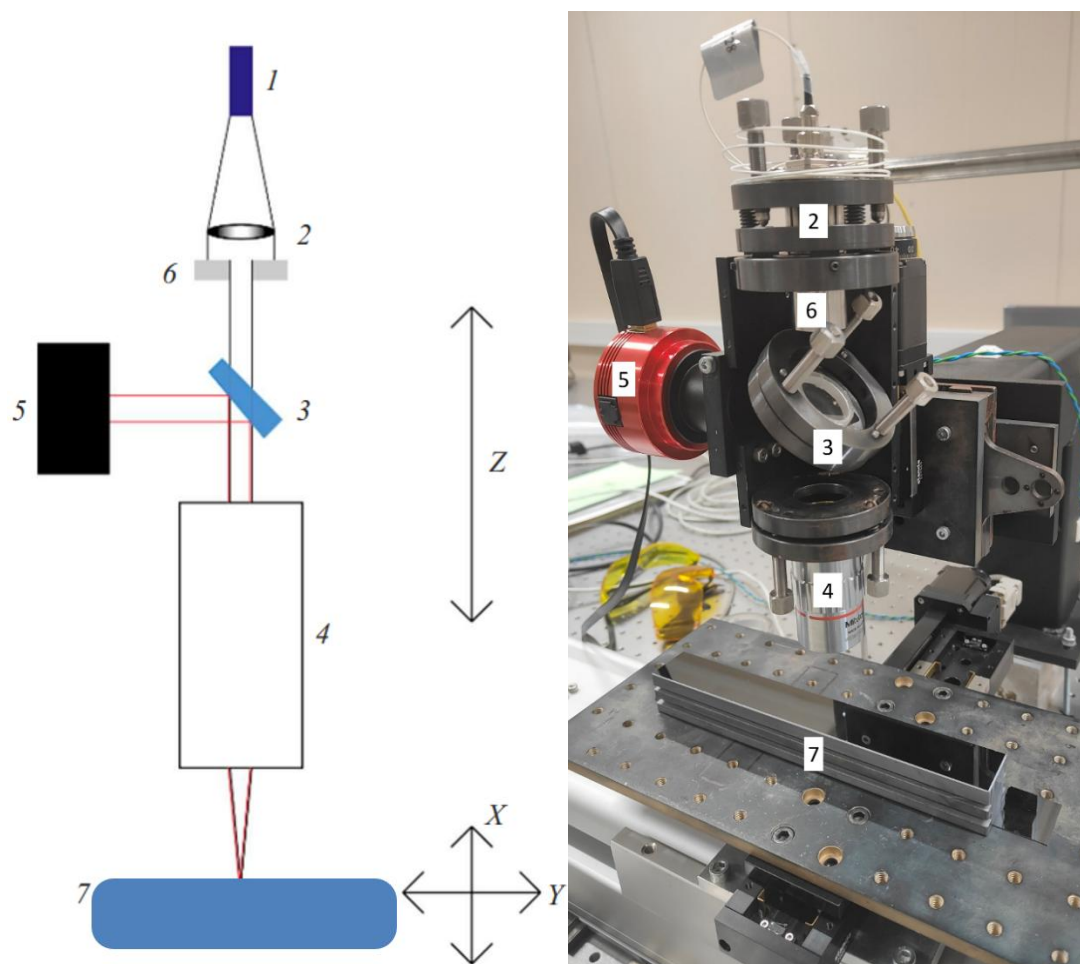


Рисунок 4.17 а) Блок схема контурографа: 1 – диодный лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – фокусирующий объектив; 5 – высокочувствительная скоростная видеокамера; 6 – диафрагма Ø 4 мм; 7 – исследуемый оптический элемент, б) Фотография прибора с установленным исследуемым оптическим элементом.

Экспериментальные образцы, их обработка и изготовление

Представленный метод нахождения контура оптической поверхности в координатах ионно-пучковой установки был применен при обработке подложки для элемента двухзеркального монохроматора для станции 1-1 «Микрофокус», строящегося синхротрона 4го поколения СКИФ (Новосибирск, Россия) [118,119]. Подложка монохроматора изготавливается из монокристаллического кремния, и представляет собой параллелепипед размером ДхШхВ 200х25х30 мм, с ориентацией рабочей поверхности <110>. Карта отклонения формы поверхности от плоскости до начала ионно-пучковой коррекции представлена на рисунке 4.18. Исходные характеристики, отклонение формы поверхности от требуемой плоскости: СКО = 25.7 нм; размах высот PV = 178 нм.

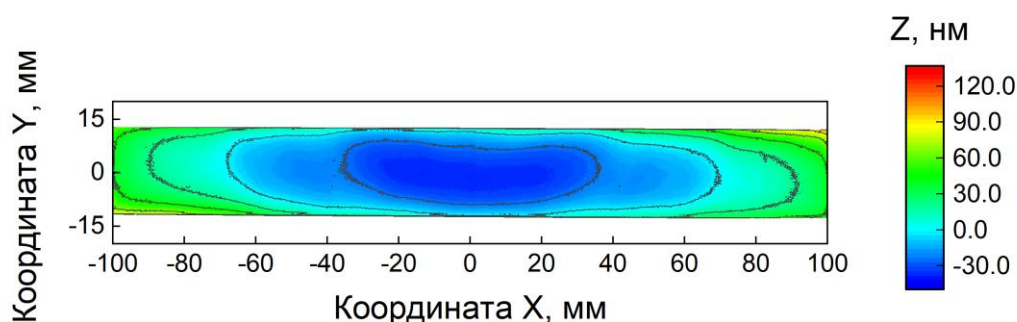


Рисунок 4.18. Карта отклонения формы поверхности кремниевого монохроматора до обработки, характеристики поверхности: СКО = 25.7 нм, PV = 178 нм.

Ионно-пучковая обработка проводилась итерационно, в соответствии с методикой, представленной в пункте 4.1. В ходе обработки применялся пучок ускоренных ионов Ag с энергией ионов 1000 эВ, полный ток ионов составлял 0.3 мА. По результатам 6 итераций ионной обработки была получена оптическая поверхность, отклонение которой от плоскости представлено на рисунке 4.19а, характеристики поверхности после обработки СКО = 3.5 нм, PV = 79 нм. На рисунке 4.19б представлено изменение целевой функции СКО отклонения формы поверхности от требуемой плоскости в ходе 6 итераций ионного травления и отмечен требуемый уровень целевой функции СКО = 1 нм.

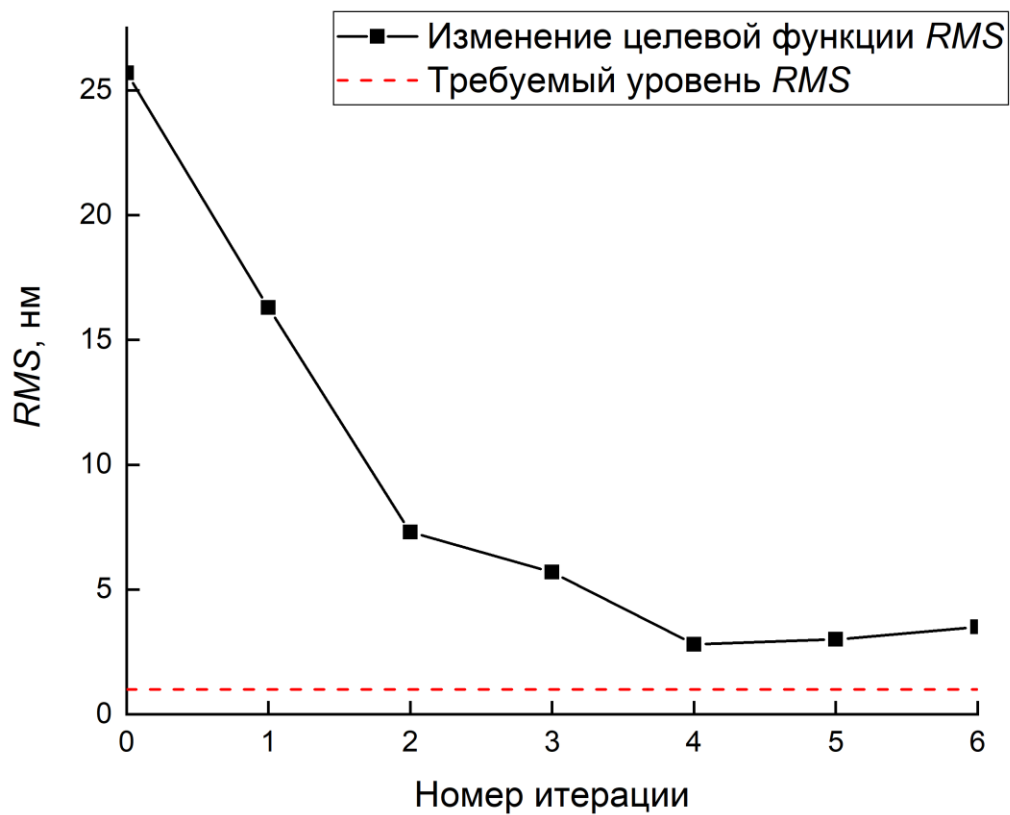
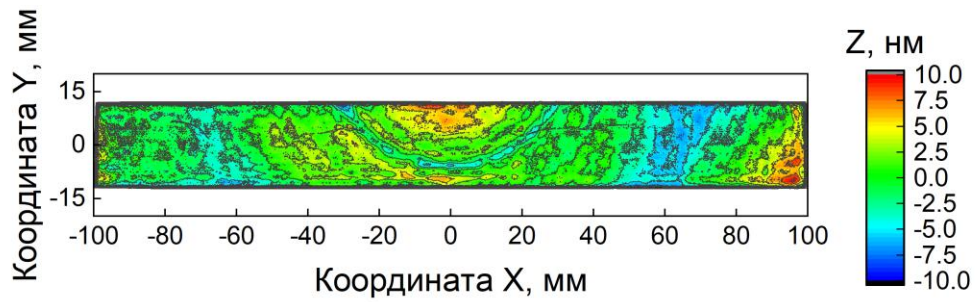


Рисунок 4.19 а) Карта ошибки формы поверхности после 6 итераций ионной обработки, характеристики поверхности СКО = 3.5 нм, PV = 79 нм. б) изменение целевой функции СКО в ходе обработки, прерывистой кривой отмечен целевой уровень. Можно видеть, что целевая функция в ходе последних двух обработок возрастала, при этом требуемый уровень целевой функции не был достигнут. Для увеличения эффективности обработки был применен контурограф, благодаря которому было проведено уточнение положения обрабатываемой поверхности относительно координат

ионно-пучковой установки. Было установлено, что оптическая поверхность смещена от расчетного положения на 0.41 мм. На рисунке 4.20 представлено сравнение измеренного положения оптической поверхности и расчетного.

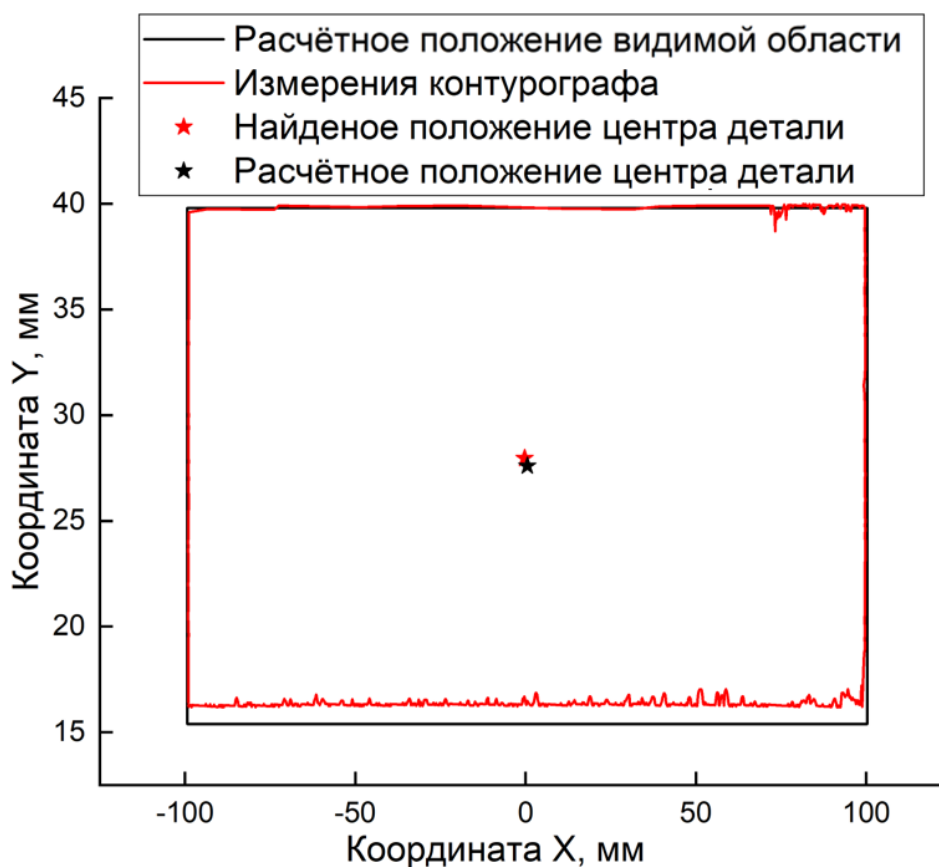


Рисунок 4.20. Сравнение предполагаемого и измеренного контура обрабатываемой оптической детали. Звездочками отмечены расчётное и найденное положения центра оптической поверхности, расстояние между ними 0.41 мм

После уточнения положения оптической поверхности относительно установки ионно-пучкового травления обработка была возобновлена. На рисунке 4.21а представлена карта отклонения формы оптической поверхности от плоскости после трёх итераций обработки с использованием контурографа. Характеристики поверхности составили СКО = 1.0 нм; PV = 18.5 нм. На рисунке 4.21б представлено изменение целевой функции СКО в ходе 9 итераций ионного травления и отмечен требуемый уровень целевой функции СКО = 1 нм.

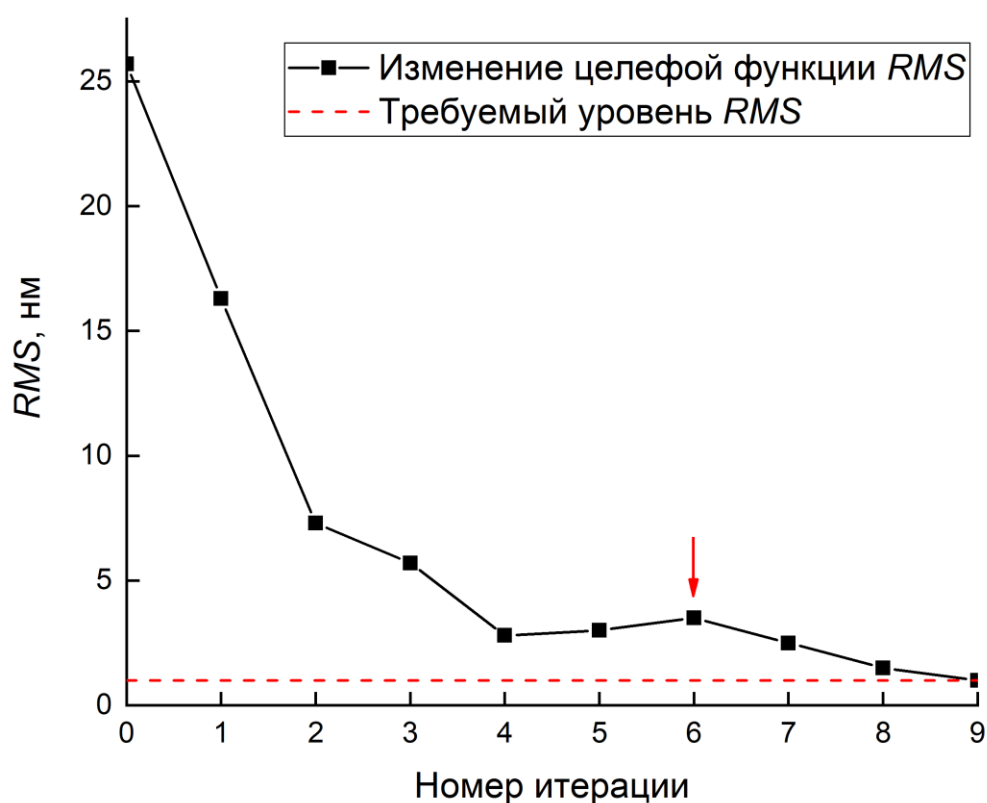
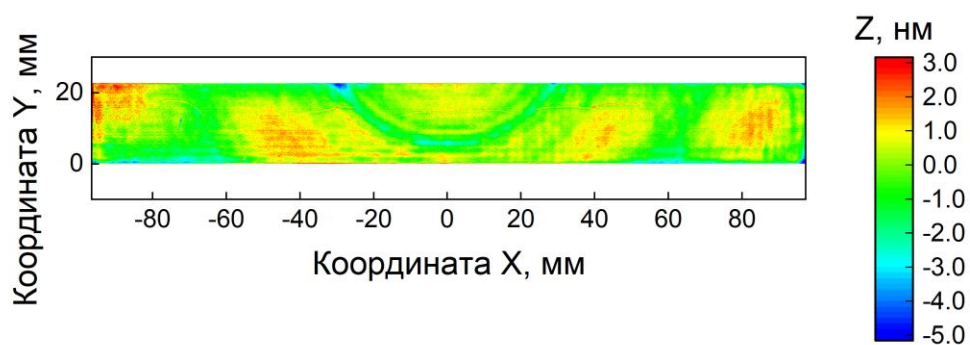


Рисунок 4.21 а) Карта ошибки формы поверхности после 6 итераций ионной обработки, характеристики поверхности СКО = 1 нм, PV = 18.5 нм. б) изменение целевой функции СКО в ходе обработки. Отмечена итерация обработки на которой было проведено уточнение положения с помощью контурографа.

Уточнение положения оптической поверхности в ионно-пучковой установке позволило изготовить рентгенооптический элемент с требуемыми параметрами СКО поверхности.

Таким образом, в рамках диссертационной работы был разработан, изготовлен и применён при коррекции формы поверхности оптической детали вспомогательный прибор – контурограф, предназначенный для точного соотнесения координат видимой области оптической детали с ее физическими габаритами. Прибор применяется для юстировки заготовки в установке ионно-пучковой коррекции. Разработанный прибор позволяет определять положение обрабатываемой поверхности с точностью до 2.5 мкм, прописывать контуры объектов произвольной формы, в том числе имеющих криволинейную форму края, а также контуры объектов, повернутых на произвольный угол относительно направления движения линейных трансляторов. Высокая точность определения положения обрабатываемого оптического элемента необходима для повышения точности ионно-пучковой обработки.

Прибор был использован при изготовлении подложки для элемента двухзеркального монохроматора для станции 1-1 «Микрофокус», строящегося синхротрона 4-го поколения СКИФ (Новосибирск, Россия). Благодаря применению контурографа удалось изготовить оптическую поверхность с требуемыми характеристиками: СКО поверхности 1.0 нм, PV = 18.5 нм.

Заключение по 4й главе

1. Продемонстрировано существование точного решения для дискретной модели пары «пучок–поверхность». Поскольку время обработки является одним из ключевых критериев обработки, реализовано решение задачи оптимизации с граничными условиями, что позволяет за конечное время достичь любого заранее заданного уровня точности.
2. На основе матричного представления задачи о коррекции локальных ошибок формы поверхности оптического элемента малоразмерным ионным пучком разработан алгоритм расчёта карты травления, применение которого позволяет формировать поверхности с ошибками формы менее 1 нм по параметру СКО.
3. Разработанные алгоритм, источник и установка обеспечивают изготовление оптических элементов произвольной формы. Благодаря регулируемому диаметру пучка (2.1–160 мм) и току ионов (0.3–200 мА) контролируемое воздействие происходит в диапазоне латеральных размеров от сотен мкм до 1 мм
4. Разработан контурограф для точного (до 2.5 мкм) позиционирования оптических деталей в установке ионно-пучковой обработки. Прибор обеспечивает определение контуров объектов произвольной формы и ориентации, что критично для повышения точности коррекции поверхности

Заключение

В рамках диссертационной работы произведено исследование процессов распыления ряда оптических материалов (монокристаллические кремний и сапфир, а также плавленый кварц), применяемых для изготовления подложек рентгеновских зеркал, а также развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики.

Показано, что при обработке поверхности монокристаллического кремния ионами инертных газов (Ar, Xe, Ne) существует пороговая энергия, при превышении которой, шероховатость поверхности всех исследованных ориентаций поверхностного среза заметно сглаживается, что позволяет применять для финишной обработки методику IBF. Для монокристаллического сапфира оптимальным является обработка ионами аргона с энергией 700 эВ при углах падения в диапазоне 0-40°. Для плавленого кварца подтверждена эффективность использования ионов аргона в диапазоне энергий 500–1250 эВ, обеспечивающая получение шероховатости $\sigma_{\text{eff}} \sim 0.25$ нм.

Для достижения поставленной цели на основе проведенных исследований была разработана и построена установка, обеспечивающая возможность ионно-пучковой обработки оптических деталей диаметром до 320 мм. В установке применены три специализированных ионных источника (широкоапертурный сильнооточный с квазипараллельным ионным пучком и два источника с фокусировкой ионного пучка), а также реализована концепция подвижной детали, что позволило в рамках одной машины реализовать полировку, асферизацию поверхностей через профилирующую диафрагму и коррекцию локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком. Проведены модификации источников ускоренных ионов КЛАН-12М и КЛАН-53М, за счет фокусирующих ИОС удалось получить ионный пучок диаметром 2.1-6 мм (для КЛАН-12М) и 6.2-25 мм (для КЛАН-53М). Таким образом, непрерывный диапазон изменения диаметра перетяжки ионного пучка от минимального – 2.1 мм до 25 мм и изменение тока ионов от 0.3 до 40 мА позволяет проводить коррекцию поверхностей любой формы и габаритов как с малым, так и значительным удалением материала, и латеральными размерами неоднородностей от десятков миллиметров до сотых долей мкм, а также изготавливать оптические элементы произвольной формы. Существенно расширен класс задач, доступных для решения с применением методики, основанной на ионно-пучковой

обработке детали при ее одномерном движении позади формирующей ионный пучок диафрагмы. В том числе предложены и реализованы методики изготовления корректоров волнового фронта, компенсирующих абберации, описываемые полиномами Цернике, осесимметричной коррекции формы для оптических элементов произвольной геометрии, формирования элементов скользящего падения (тороидов и цилиндров). Развитие математического аппарата описания процесса коррекции локальных ошибок формы позволило показать, что для любой дискретной модели пары «пучок–поверхность» существует точное решение задачи минимизации ошибок формы поверхности. А для практического применения метода предложен оптимизационный алгоритм, позволяющий за конечное время достичь любого заранее заданного уровня точности. Для повышения точности процедуры коррекции локальных ошибок формы, для которой важна точная привязка координатной сетки измеренной карты ошибок формы поверхности к реальной поверхности детали разработан контурограф, обеспечивающий точность установки образца произвольной геометрии в установку на уровне 2.5 мкм.

Список литературы

1. Levinson H. J. High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future / H. J. Levinson // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2022. – Т. 61. – №. SD. – С. SD0803.
2. Hoffman C. Optics research at the US naval research laboratory / C. Hoffman, T. G. Giallorenzi, L. B. Slater // *Applied Optics*. – 2015. – Т. 54. – №. 31. – С. F268-F285.
3. Барышева М. М. Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов / М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко и др. // *Успехи физических наук*. – 2012. – Т. 182. – №. 7. – С. 727-747.
4. 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 et al. // *Optics Express*. – 2022. – Т. 30. – №. 26. – С. 47567-47586.
5. Born M. Resolving power of image-forming system / M. Born, E. Wolf // *Principles of Optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* / ed. by M. Born, E. Wolf. – 7th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. – Разд. 8.6.2. – С. 461.
6. Born M. Tolerance conditions for primary aberrations / M. Born, E. Wolf // *Principles of Optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* / ed. by M. Born, E. Wolf. – 7th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. – Разд. 9.3. – С. 528.
7. Wang T. Ion beam figuring system for synchrotron x-ray mirrors achieving sub-0.2- μ rad and sub-0.5-nm root mean square / T Wang, L Huang, Y Zhu et al. // *Nanomanufacturing and Metrology*. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 20.
8. Lin Z. A review of material surface processing utilizing gas cluster ion beam technology / Z Lin, X Li, G Chen et al. // *The European Physical Journal D*. – 2025. – Т. 79. – №. 5. – С. 50.
9. Arnold T. Ion beam figuring machine for ultra-precision silicon spheres correction / T Arnold, F Pietag // *Precision Engineering*. – 2015. – Т. 41. – С. 119-125.
10. Xu M. Structure optimization and fabricating capability analysis of an ion-beam machine for a subnanometer optical surface / M Xu, Y Dai, X Xie et al. // *Applied optics*. – 2015. – Т. 54. – №. 27. – С. 8055-8061.

11. Wang T. Universal dwell time optimization for deterministic optics fabrication / T Wang, L Huang, M Vescovi et al. //Optics express. – 2021. – T. 29. – №. 23. – C. 38737-38757.
12. Idir M. A one-dimensional ion beam figuring system for x-ray mirror fabrication / M Idir, L Huang, N Bouet //Review of Scientific Instruments. – 2015. – T. 86. – №. 10.
13. Mercier R. High-precision cylindrical and quasi-cylindrical aspherization of small surfaces by ion beam figuring / R Mercier, M Mullot, M Lamare et al.//Optical Fabrication and Testing. – SPIE, 1999. – T. 3739. – C. 155-160.
14. Miao E. Full-frequency sub-nanometer optics fabrication and testing / E Miao, G Wang, S Gao et al.//International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2015). – SPIE, 2015. – T. 9524. – C. 768-776.
15. Wang Y. Study on rapid convergence strategy of nano-precision optical surface by ion beam figuring / Y Wang, Y Dai, H Hu et al. //Optics Communications. – 2022. – T. 507. – C. 127614.
16. Malyshev I.V. Principles of Certification of Aspherical Mirrors for an EUV Lithography Lens at a Wavelength of 13.5 nm / I.V. Malyshev, M. N. Toropov, and N. I. Chkhalo // Journal of Surface Investigation. Xray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – T. 9. – № 4. – C. 735–740.
17. Kuzin S. V. The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft / SV Kuzin, IA Zhitnik, SV Shestov et al. //Solar System Research. – 2011. – T. 45. – №. 2. – C. 162-173.
18. Малышев И. В. Состояние разработки микроскопа на длину волны 3.37 нм в ИФМ РАН / ИВ Малышев, АЕ Пестов, ВН Полковников и др.//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – №. 1. – С. 3-13.
19. Yamauchi K. Single-nanometer focusing of hard x-rays by Kirkpatrick–Baez mirrors / K Yamauchi, H Mimura, T Kimura et al. //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2011. – T. 23. – №. 39. – C. 394206.
20. Fei W. Feature-based characterization and extraction of ripple errors over the large square aperture / W Fei, L Zhao, J Bai et al. //Optics Express. – 2021. – T. 29. – №. 6. – C. 8296-8311.

21. Bass M. (ed.). Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design. – McGraw-Hill Professional Publishing, 1995.
22. Li Z. Z. Removal of single point diamond-turning marks by abrasive jet polishing / ZZ Li, JM Wang, XQ Peng et al. //Applied optics. – 2011. – T. 50. – №. 16. – C. 2458-2463.
23. Zhu W. L. Compliant grinding and polishing: A review / WL Zhu, A Beaucamp //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2020. – T. 158. – C. 103634.
24. Goel S. Diamond machining of silicon: a review of advances in molecular dynamics simulation / S Goel, X Luo, A Agrawal et al. //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – T. 88. – C. 131-164.
25. Shinozaki A. Diamond tool wear in the ultra-precision cutting of large electroless nickel coated molding dies / A Shinozaki, Y Namba. //International Journal of Automation Technology. – 2011. – T. 5. – №. 3. – C. 283-288.
26. Chon K. Precision machining of electroless nickel mandrel and fabrication of replicated mirrors for a soft x-ray microscope / KS Chon, Y Namba, KH Yoon //JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing. – 2006. – T. 49. – №. 1. – C. 56-62.
27. Shi X. L. Achieving ultralow surface roughness and high material removal rate in fused silica via a novel acid SiO₂ slurry and its chemical-mechanical polishing mechanism / XL Shi, G Chen, L Xu et al. //Applied Surface Science. – 2020. – T. 500. – C. 144041.
28. Demmler M. Ion beam figuring (IBF) for high precision optics / M Demmler, M Zeuner, F Allenstein et al.//Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics III. – SPIE, 2010. – T. 7591. – C. 203-211.
29. Wilson S. R. Surface figuring using neutral ion beams / SR Wilson, DW Reicher, JR McNeil //Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics. – SPIE, 1989. – T. 966. – C. 74-81.
30. Wang T. Study on an effective one-dimensional ion-beam figuring method / T Wang, L Huang, M Vescovi et al. //Optics express. – 2019. – T. 27. – №. 11. – C. 15368-15381.
31. Du C. Ion Beam Polishing Technology / C Du, H Hu, Y Dai //Advanced Finishing Technologies for High Performance Manufacturing. – Springer, Singapore, 2025. – C. 263-304.

32. Golini D. et al. Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing / D Golini, WI Kordonski, P Dumas et al. //Optical manufacturing and testing III. – SPIE, 1999. – Т. 3782. – С. 80-91.
33. Harris D. C. History of magnetorheological finishing / D. C. Harris //Window and dome technologies and materials XII. – SPIE, 2011. – Т. 8016. – С. 206-227
34. Wang, B. Digital, intelligent, and all-round optical manufacturing method-magnetorheological finishing (wheel type): a review. / B Wang, W Zhang, Z Wang et al. // Int J Adv Manuf Technol 138, 5057–5096 (2025).
35. Zhang Z. Fluid Jet Polishing / Z Zhang, CF Cheung, J Guo et al.//Advanced Finishing Technologies for High Performance Manufacturing. – Springer, Singapore, 2025. – С. 177-202.
36. Wang C. J. Development of a fluid line-jet polishing process for rotational axisymmetric surfaces / CJ Wang, CF Cheung, LT Ho et al. //Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Т. 61. – С. 15-24.
37. Fähnle O. W. Fluid jet polishing of optical surfaces / OW Fähnle, H Van Brug, HJ Frankena //Applied optics. – 1998. – Т. 37. – №. 28. – С. 6771-6773.
38. Lee C. C. Making aspherical mirrors by thin-film deposition / CC Lee, D Wan, C Jaing CC Lee, D Wan, C Jaing et al. //Applied optics. – 1993. – Т. 32. – №. 28. – С. 5535-5540.
39. Дуров К. В. Высокоградиентная асферизация подложек тонкопленочными покрытиями Al/Si / КВ Дуров, СА Минеев, ВН Полковников и др.//Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 8. – С. 1288-1294.
40. Huang H. The Fabrication of a High-Precision Rotational Symmetric Hyperboloid Mirror by Magnetron Sputtering with Film Thickness Correction / H Huang, Y Feng, J Yu et al. //Coatings. – 2022. – Т. 12. – №. 8. – С. 1055.
41. Худолей А. и др. Высокоточная обработка поверхностей материалов магнитореологическими жидкостями //Наука и инновации. – 2015. – Т. 6. – №. 148. – С. 20-23.
42. Deterministic magnetorheological finishing: пат. ЕР 0858381 В1. Европейское патентное ведомство; заявл. 11.10.1996; опубл. 19.08.1998. – 40 с.
43. Fang H. Surface roughness and material removal in fluid jet polishing / H Fang, P Guo, J Yu //Applied optics. – 2006. – Т. 45. – №. 17. – С. 4012-4019.

44. Li Z. Z. Removal of single point diamond-turning marks by abrasive jet polishing / ZZ Li, JM Wang, XQ Peng et al. //Applied optics. – 2011. – Т. 50. – №. 16. – С. 2458-2463.
45. Allen L. N. Demonstration of an ion-figuring process / LN Allen, HW Romig //Advanced optical manufacturing and testing. – SPIE, 1990. – Т. 1333. – С. 22-33.
46. Zorina M. V. On the formation of an anti-reflection layer on the surface of single-crystal silicon by ion-beam etching / MV Zorina, SA Kraev, AY Lopatin et al. //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Т. 17. – №. Suppl 1. – С. S259-S264.
47. 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 / MS Mikhailenko, AE Pestov, NI Chkhalo et al. //Applied Optics. – 2022. – Т. 61. – №. 10. – С. 2825-2833.
48. Opteg [Электронный ресурс]: официальный сайт. – Электрон. дан. – Forest, VA, США, 2024. – URL: <https://www.opteg.com/> (дата обращения: 07.03.2025).
49. Behrisch R. The sputtering mechanism for low-energy light ions / R Behrisch, G Maderlechner, BMU Scherzer et al.//Applied physics. – 1979. – Т. 18. – №. 4. – С. 391-398.
50. Kaufman H. R. Ion sources for ion machining applications / HR Kaufman, PD Reader, GC Isaacson //AIAA Journal. – 1977. – Т. 15. – №. 6. – С. 843-847.
51. Kolari K. Deep plasma etching of glass with a silicon shadow mask //Sensors and Actuators A: Physical. – 2008. – Т. 141. – №. 2. – С. 677-684.
52. Arnold T. Reactive ion beam figuring of optical aluminium surfaces / J Bauer, F Frost, T Arnold //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Т. 50. – №. 8. – С. 085101.
53. Tang T. Y. Polymerdimethylsiloxane surface treatment with an atmospheric pressure helium plasma jet driven by unipolar nanosecond pulses / T.Y. Tang, H. Lee, H.S. Kim et al. //Current Applied Physics. – 2021. – Т. 29. – С. 9-17.
54. Egert C. M. Roughness evolution of optical materials induced by ion-beam milling //Current Developments in Optical Design and Optical Engineering II. – SPIE, 1992. – Т. 1752. – С. 63-72.
55. Carnal C. L. Advanced matrix-based algorithm for ion-beam milling of optical components / C.L. Carnal, C.M. Egert, K.W. Hylton//Current Developments in Optical Design and Optical Engineering II. – SPIE, 1992. – Т. 1752. – С. 54-62.

56. Franz T., IBF technology for nanomanufacturing technology / T Franz, T Hänsel //5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. – SPIE, 2010. – T. 7655. – C. 269-272.
57. Chkhalo N. I. Manufacturing of XEUV mirrors with a sub-nanometer surface shape accuracy / NI Chkhalo, EB Kluev, AE Pestov et al. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – T. 603. – №. 1-2. – C. 62-65.
58. Ishikawa T. 1-km beamline at SPring-8 / T Ishikawa, K Tamasaku, M Yabashi et al. //Advances in X-Ray Optics. – SPIE, 2001. – T. 4145. – C. 1-10.
59. Yamauchi K. Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining / K Yamauchi, H Mimura, K Inagaki et al. //Review of scientific instruments. – 2002. – T. 73. – №. 11. – C. 4028-4033.
60. Schindler A. Finishing procedure for high-performance synchrotron optics / A. Schindler, T. Haensel, A. Nickel et al. //Optical Manufacturing and Testing V. – SPIE, 2003. – T. 5180. – C. 64-72.
61. Shurvinton R. Ion beam figuring for X-ray mirrors: history, state-of-the-art and future prospects / R. Shurvinton, H. Wang, P. Pradhan et al. //Synchrotron Radiation. – 2024. – T. 31. – №. 4. – C. 655-669.
62. Schaefer D. Basics of ion beam figuring and challenges for real optics treatment //Fifth European Seminar on Precision Optics Manufacturing. – SPIE, 2018. – T. 10829. – C. 38-45.
63. Liu C. Profile etching for prefiguring X-ray mirrors / C. Liu, J. Qian, L. Assoufid //Synchrotron Radiation. – 2015. – T. 22. – №. 2. – C. 458-460.
64. Михайленко М. С. и др. Перспективы применения реактивного ионно-пучкового травления плавленого кварца смесью тетрафторметана и аргона для асферизации поверхности оптических элементов / МС Михайленко, АЕ Пестов, АК Чернышев и др. //Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – №. 8. – С. 1248-1252.
65. Akashi T., Yoshimura Y. Deep reactive ion etching of borosilicate glass using an anodically bonded silicon wafer as an etching mask //Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2006. – T. 16. – №. 5. – C. 1051.

66. J.H. Park Deep dry etching of borosilicate glass using SF₆ and SF₆/Ar inductively coupled plasmas / J.H. Park, N.E. Lee, J. Lee et al. // *Microelectron. Eng.* 82 (2005) 119–128.
67. Metwalli E. E., Pantano C. G. Reactive ion etching of glasses: Composition dependence // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2003. – T. 207. – №. 1. – C. 21-27.
68. Yang B. Design of a large five-axis ultra-precision ion beam figuring machine: structure optimization and dynamic performance analysis / B Yang, X Xie, L Zhou et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – T. 92. – №. 9. – C. 3413-3424.
69. Chkhalo N. I. et al. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams / NI Chkhalo, IA Kaskov, IV Malyshev et al. // *Precision Engineering.* – 2017. – T. 48. – C. 338-346.
70. Liao W. Mathematical modeling and application of removal functions during deterministic ion beam figuring of optical surfaces. Part 1: Mathematical modeling / W Liao, Y Dai, X Xie, L Zhou et al. // *Applied optics.* – 2014. – T. 53. – №. 19. – C. 4266-4274.
71. Liao W. et al. Mathematical modeling and application of removal functions during deterministic ion beam figuring of optical surfaces. Part 2: application / W Liao, Y Dai, X Xie, L Zhou et al. // *Applied Optics.* – 2014. – T. 53. – №. 19. – C. 4275-4281.
72. Chkhalo N. I. Ion-beam polishing of fused silica substrates for imaging soft x-ray and extreme ultraviolet optics / NI Chkhalo, SA Churin, MS Mikhaylenko et al. // *Applied Optics.* – 2016. – T. 55. – №. 6. – C. 1249-1256.
73. Liao W. Morphology evolution of fused silica surface during ion beam figuring of high-slope optical components / W Liao, Y Dai, X Xie et al. // *Applied Optics.* – 2013. – T. 53. – №. 16. – C. 3719-3725.
74. Peverini L. Ion beam profiling of aspherical X-ray mirrors / L Claustre, S Guillet, JY Massonnat et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* – 2010. – T. 616. – №. 2-3. – C. 115-118.
75. Preda I. Ion beam etching of a flat silicon mirror surface: A study of the shape error evolution / I Preda, A Vivo, F Demarcq et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – T. 710. – C. 98-100.

76. Eisenberg N. P. Aspheric generation on glass by ion beam milling / N. P. Eisenberg, R. Carouby, J. Broder //6th Mtg in Israel on Optical Engineering. – SPIE, 1989. – T. 1038. – C. 279-287.

77. Zhang Y. High-precision ion beam figuring of X-ray plane mirrors for the bendable KB focusing system / Y Zhang, Q Huang, S Yan et al.//Frontiers in Physics. – 2022. – T. 10. – C. 865411.

78. Bauer J. Improved ion beam tools for ultraprecision figure correction of curved aluminum mirror surfaces / J Bauer, M Ulitschka, T Arnold et al. //Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. – 2018. – T. 4. – №. 4. – C. 046003-046003.

79. Arnold T. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques—status and outlook / T Arnold, G Böhm, R Fechner et al. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2010. – T. 616. – №. 2-3. – C. 147-156.

80. Zhou L. Analysis of correcting ability of ion beam figuring / L Zhou, YF Dai, XH Xie et al. //Key Engineering Materials. – 2008. – T. 364. – C. 470-475.

81. Malyshev I. V Deformation-free rim for the primary mirror of telescope having sub-second resolution / IV Malyshev, NI Chkhalo, MN Toropov. et al. //EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V. – SPIE, 2017. – T. 10235. – C. 52-58.

82. Siewert F. Ultra-precise characterization of LCLS hard X-ray focusing mirrors by high resolution slope measuring deflectometry / F Siewert, J Buchheim, S Boutet et al. //Optics express. – 2012. – T. 20. – №. 4. – C. 4525-4536.

83. Wilson S. R., McNeil J. R. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces //Optical Fabrication and Testing. – Optica Publishing Group, 1987. – C. FAA4.

84. Jiao C., Li S., Xie X. Algorithm for ion beam figuring of low-gradient mirrors //Applied Optics. – 2009. – T. 48. – №. 21. – C. 4090-4096.

85. Wang T. RIFTA: A Robust Iterative Fourier Transform-based dwell time Algorithm for ultra-precision ion beam figuring of synchrotron mirrors / T Wang, L Huang, H Kang et al.//Scientific reports. – 2020. – T. 10. – №. 1. – C. 8135.

86. Drueding T. W., Bifano T. G., Fawcett S. C. Contouring algorithm for ion figuring // Precision Engineering. – 1995. – T. 17. – №. 1. – С. 10-21.
87. Allen L. N., Keim R. E. An ion figuring system for large optic fabrication // Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics. – SPIE, 1989. – T. 1168. – С. 33-50.
88. Chernyshev, A. Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements / A. Chernyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov et al. // Precision Engineering. – 2021. – V.69. – P.29-35
89. Wang T. Hybrid height and slope figuring method for grazing-incidence reflective optics T Wang, L Huang, X Ke et al. // Synchrotron Radiation. – 2023. – T. 30. – №. 1. – С. 65-75.
90. Sigmund, P. Theory of Sputtering. I. Sputtering Yields of Amorphous and Polycrystalline Targets / P. Sigmund // Phys. Rev. – 1969. – Vol.184. – No. 2. – P. 383–415.
91. Bradley, R.M. Theory of ripple topography induced by ion bombardment / R.M. Bradley, J.M.E. Harper // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1988. – Vol. 6. – No.4. – 2390-2395.
92. 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 et al. // Journal of X-Ray Science and Technology. – 2019. - vol. 27. - no. 5. - P. 857-870.
93. Chkhalo N. Correction of the EUV mirror substrate shape by ion beam / N Chkhalo, L Paramonov, A Pestov et al. // Micro-and Nanoelectronics 2007. – SPIE, 2008. – T. 7025. – С. 27-30.
94. Chkhalo, N. I. Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics / N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina // Rev. Sci. Instrum. – 2015. – T. 86. – С. 016102.
95. Кремниевые пластины и услуги по обработке [Электронный ресурс] // ТЕЛЕКОМ-СТВ. – Электрон. дан. – Москва, 2024. – URL: https://www.telstv.ru/?page=en_silicon_wafers (дата обращения: 25.11.2024).
96. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – T. 268. – №. 11-12. – С. 1818-1823.

97. Wei Q. Angular dependence of sputtering yield of amorphous and polycrystalline materials / Q Wei, KD Li, J Lian et al. //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Т. 41. – №. 17. – С. 172002.
98. Karger A. M. Figuring Miniature Aspherics—Ion Polishing //Applied Optics. – 1973. – Т. 12. – №. 3. – С. 451-454.
99. Mikhailenko M. S. Study of the Influence of Ion-Beam Etching on the Surface Roughness of Single-Crystal Sapphire / MS Mikhailenko, AE Pestov, AK Chernyshev et al. //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Т. 17. – №. 6. – С. 1338-1342.
100. Михайленко, М.С. Изучение влияния энергии ионов аргона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев и др.// Журнал технической физики. – 2022. – т.92. – вып.8. – с.1219-1223.
101. Pestov A.E. Device for the precise shape correction of optical surfaces by ion-beam and reactive plasma etching / IG Zabrodin, BA Zakalov, AE Pestov et al. //Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2013. – Т. 7. – №. 5. – С. 913-915.
102. 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.
103. Mikhailenko, M.S. Miniature source of accelerated ions with focusing ion-optical system / M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, L.A. Goncharov, A.K. Chernyshev, I.G. Zabrodin, I. Kaskov, P.V. Krainov, D.I. Astakhov, V.V. Medvedev // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2021. – v.1010. – 165554
104. Малышев И. В. Внеосевой асферический коллектор для экстремальной ультрафиолетовой литографии и мягкой рентгеновской микроскопии /ИВ Малышев, МС Михайленко, АЕ Пестов и др. //Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – №. 7. – С. 963-967.
105. Пестов А.Е. Применение ионно-пучкового травления для «глубокой» асферизации линз / М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко и др.// Материалы симпозиума ”Нанопизика и наноэлектроника“, г. Нижний Новгород, 12–16 марта 2012. Т. 2. С. 607–608.

106. Артюхов А. И. Безмасочный литограф прямого рисования. Конструкция, устройство и применение / АИ Артюхов, НИ Чхало, РА Шапошников и др. // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 8. – С. 1295-1301.
107. Забродин, И.Г. Ионно-пучковые методики прецизионной обработки оптических поверхностей / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев и др. // Журнал технической физики. – 2020. – т.90, вып.11. – С.1922-1930.
108. Перекалов А. А. Система визуализации плазменного факела бетатронного источника рентгеновского излучения / А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – №. 8. – С. 1202-1206.
109. Зорина, М.В. Формирование прецизионных оптических элементов методом ионно-пучкового травления / Зорина М.В., Пестов А.Е., Чхало Н.И и др. // Научно-технической журнал «Контенант». – 2014. - Т.13.№2. – С.34-42.
110. Savvides N. Correction masks for large-area ion beam etching and figuring of optics // Journal of applied physics. – 2006. – Т. 99. – №. 9.
111. Чхало Н. И. Рентгеновская оптика дифракционного качества: технология, метрология, применения / НИ Чхало, ИВ Малышев, АЕ Пестов и др. // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 1. – С. 74-91.
112. Niu K., Tian C. Zernike polynomials and their applications // Journal of Optics. – 2022. – Т. 24. – №. 12. – С. 123001.
113. Hudec R. Kirkpatrick-Baez (KB) and Lobster Eye (LE) Optics for Astronomical and Laboratory Applications // X-Ray Optics and Instrumentation. – 2010. – Т. 2010. – №. 1. – С. 139148.
114. Schuster M., Gobel H. // J. Phys. D. 1995. V. 28. № 4A. P. A270.
115. Gobel H. // Abstracts ACA Annual 1 Meeting. Pittsburg. August 9–14, 1992. V. 20. P. 34.
116. Malyshev I. V. Surface shape measurement of mirrors in the form of rotation figures by using point diffraction interferometer / IV Malyshev, NI Chkhalo, MN Toropov et al. // Journal of Modern Optics. – 2017. – Т. 64. – №. 4. – С. 413-421.
117. Glushkov E.I., Malyshev I.V., Petrakov E.V., Chkhalo N.I., Khomyakov Yu.V., Rakshun Ya.V., Chernov V.A., Dolbnya I.P. // J. Surf. Invest: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17. № 1. P. 233.

118. Chernov V.A., Bataev I.A., Rakshun Y.V., Khomyakov Y.V., Gorbachev M.V., Trebushinin A.E., Chkhalo N.I., Krasnorutskiy D.A., Naumkin V.S., Sklyarov A.N., Mezentsev N.A., Korsunsky A.M., Dolbnya I.P. // Rev. Sci. Instrum. 2023. V. 94 P. 013305.
119. 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, // Optics Express – 2022. – V.30. - No.26. – P.47567-47586
120. Ansys Optics [Электронный ресурс] : официальный сайт. – Электрон. дан. – Canonsburg, PA, США, 2024. – URL: <https://optics.ansys.com/> (дата обращения: 25.11.2024).

Список публикаций автора

- A1. Чернышев, А.К. Моделирование процесса коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком / А.К. Чернышев, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, и др. // Журнал технической физики. – 2019. – т.89, вып. 11. – С.1650-1655.
- A2. Пестов, А.Е. Ионно-пучковые методики прецизионной обработки оптических поверхностей / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев и др. // Журнал технической физики. – 2020. – т.90, вып.11. – С.1922-1930.
- A3. Mikhailenko, M.S. Miniature source of accelerated ions with focusing ion-optical system / M.S. Mikhailenko, L.A. Goncharov, A.K. Chernyshev, et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. – 2021. – v.1010. – 165554
- A4. Chernyshev, A. Matrix based algorithm for ion-beam figuring of optical elements / A. Chernyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov et al. // Precision Engineering. – 2021. – V.69. – P.29-35
- A5. Торопов, М.Н. Линзовый корректор волнового фронта для изучения плоских поверхностей / М.Н. Торопов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало и др. // Журнал технической физики. – 2021. – т.91. – вып.10. – с.1583-1587.
- A6. Михайленко, М.С. Изучение влияния энергии ионов аргона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев и др. // Журнал технической физики. – 2022. – т.92. – вып.8. – с.1219-1223.
- A7. 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.K. Chernyshev, I.I. Kuznetsov et al. // Applied Optics. – Vol. 61. – Issue 10. – pp. 2825-2833 (2022)
- A8. Chernyshev, A.K. Axisymmetric surface shape correction of optical elements by a wide-aperture ion beam / A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov et al. // Applied Optics. – Vol. 61. – Issue 33. – pp. 9879-9887 (2022)

- A9. 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, A.K. Chernyshev et al. // Optics Express – 2022. – V.30. - No.26. – P.47567-47586.
- A10. Kumar, N. Raman scattering studies of low energy Ar⁺ ion implanted monocrystalline silicon for synchrotron applications / N. Kumar, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, и др.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2023. – v.534. – p.97–102.
- A11. Чхало, Н.И. Внеосевой асферический коллектор для экстремальной ультрафиолетовой литографии и мягкой рентгеновской микроскопии / Н.И. Чхало, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев и др.// Журнал технической физики. – 2023. – т.93. – вып.7. – с. 963-967.
- A12. Чхало, Н.И. Изучение влияния энергии ионов неона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния при ионном травлении / Н.И. Чхало, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев и др. // Журнал технической физики. – 2023. – т.93. – вып.7. – с. 1046-1050.
- A13. Михайленко, М.С. Исследование влияния травления ионными пучками на шероховатость поверхности монокристаллического сапфира / М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – №12. – С.25-30.
- A14. Дедкова, А.А. Использование морфометрических величин при изучении рельефа поверхности рентгенооптических элементов / А.А. Дедкова, И.В. Флоринский, А.К. Чернышев // Журнал технической физики. - 2023. - Т. 93. - № 7. - С. 1059-1068.
- A15. Малышев, И.В. Корреляционная экстремальная ультрафиолетовая, ультрафиолетовая и оптическая микроскопия на базе зеркального микроскопа с аксиальной томографией / И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, А.К. Чернышев и др. // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – № 7. – С. 1302-1313.
- A16. Pestov, A.E. Technique for forming substrates for grazing incidence X-ray mirrors with cylindrical surface profiles / A.E. Pestov, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko et al // Applied Optics. – 2025. – V. 64. – No. 4. – p. 837-844.

A17. Petrakov E. V. Metrology of the Shape of Large-Size and Aspherical X-ray Mirrors with Subnanometer Accuracy / E. V. Petrakov, E. I. Glushkov, A. K. Chernyshev et al.// Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Т. 18. – №. Suppl 1. – С. S58-S68.

A18. Чернышев А.К. Прибор для определения контура видимой части оптических элементов (контурограф) / Артюхов А.И., Глушков Е.И., Михайленко М.С. и др.// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2025. - №4. - С. 28-36.

A19. Chernyshev A. Ion polishing of optical components using optimized axisymmetric processing with a wide-aperture ion source / A. Chernyshev, N. Chkhalo, M. Mikhailenko et al. // Applied Optics - 2025 - Vol. 64 - No. 30 - p. 9129-9136.

Патенты

П1. Михайленко М.С., Малышев И.В., Пестов А.Е., Торопов М.Н., Чернышев А.К., Чхало Н.И.; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научноисследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»); Способ осесимметричной коррекции оптических деталей произвольной формы; Патент №2793080; Заявка № 202215627;

П2. 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;

П3. Алексей Евгеньевич ПестовАлексей Константинович ЧернышевМихаил Сергеевич МихайленкоИлья Вячеславович Малышев; Общество с ограниченной ответственностью "Интероптикс"; Способ формирования оптических элементов с формой поверхности в виде цилиндрического сегмента методом ионно-лучевого травления. Патент № RU2024134916A; Заявка №2024134916

Тезисы и материалы конференций

1. А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, Н.И. Чхало / Определение коэффициентов распыления кристаллических и аморфных оптических материалов // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г., т.1, с. 488-489. (стенд)
2. А.К. Чернышев, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало / Моделирование процесса коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 11-14 марта 2019 г., т.1, с. 529-530. (стенд)
3. И. Г. Забродин, М. В. Зорина, И. А. Каськов, И. И Кузнецов, М. С. Михайленко, А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, А. К. Чернышев, Н. И. Чхало / Возможности и перспективы метода прецизионной ионно-пучковой обработки оптических поверхностей // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-13 марта 2020 г., т.2, с. 865-866. (приглашенный)
4. М.В. Зорина, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.Н. Нечай, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Проект установки для прецизионного формообразования оптических элементов методом реактивно-лучевого травления // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-13 марта 2020 г., т.2, с. 871-872. (стенд)
5. М.С. Михайленко, Л.А. Гончаров, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, И.Г. Забродин, И.А. Каськов / Источник с высокой плотностью тока ионов для задач глубокой коррекции формы рентгенооптических элементов // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-13 марта 2020 г., т.2, с. 891-892. (устный)
6. А. К. Чернышев, И. В. Малышев, А. Е. Пестов, Н. И. Чхало, М. С. Михайленко / Применение итерационного алгоритма для коррекции локальных ошибок формы поверхности // Материалы симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-13 марта 2020 г., т.2, с. 922-923. (стенд)

7. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Модернизация установки коррекции локальных ошибок формы поверхностей оптических элементов // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 425. (устный)
8. А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, Н.И. Чхало, М.Н. Торопов, И.В. Малышев, А.А. Ахсаханян, В.Н. Полковников, Н.С. Куликов, М.В. Зорина / Программа для коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком на основе матричного алгоритма // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 464. (устный)
9. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало «Изучение ионного распыления монокристаллического кремния с целью формирования рентгенооптических элементов» Тезисы докладов объединённой конференции "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике", 2021 год, стр. 266-267. (устный)
10. А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, Н.И. Чхало, М.Н. Торопов, И.В. Малышев, А.А. Ахсаханян, В.Н. Полковников, М.В. Зорина, А.А. Рева «Программа коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком на основе матричного алгоритма» Тезисы докладов объединённой конференции "Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике", 2021 год, стр. 299-300. (устный)
11. Ю. А. Вайнер, М. В. Зорина, М. С. Михайленко, Н. Кумар, А. Е. Пестов, М. В. Свечников, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Изучение ионного распыления монокристаллического кремния с целью формирования подложек многослойных рентгеновских зеркал // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 373. (устный)
12. М.Н. Торопов, А.А. Ахсаханян, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, А.К. Чернышов, Н.И. Чхало / Высокоточный корректор волнового фронта для изучения плоских поверхностей // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и наноплектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 458. (стенд)

13. М.В. Зорина, И.И. Кузнецов, М.С. Михайленко, О.В. Палашов, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Ионно-пучковая обработка поверхности составляющих композитных элементов из разнородных материалов для лазеров с высокой средней и пиковой мощностью // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 403. (стенд)
14. Ю.А. Вайнер, М.В. Зорина, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, П.А. Юнин, С.В. Кузин, А.А. Рева / Прецизионный плоский элемент монохроматора из монокристаллического кремния [011] // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 375. (стенд)
15. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Расчет масок для проведения асферизации поверхности ионным пучком с большой апертурой // Материалы XXV Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2021. – Т.1. – С. 427. (стенд)
16. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало / Установка реактивнолучевого травления // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 576. (стенд)
17. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало / Установка реактивно-лучевого травления // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 576. (стенд)
18. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко, Н. Кумар / Эволюция шероховатости монокристаллического кремния при травлении ускоренными ионами Ag // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 578. (устный)
19. 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 «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 612. (устный)

20. А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко / Коэффициент распыления монокристаллического кремния, модели // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 620. (стенд)

21. А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, Н.И. Чхало, М.Н. Торопов, И.В. Малышев / Модернизация программы коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком “РМС” // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2022. – Т.1. – С. 622. (стенд)

22. М.В. Зорина, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, И.И. Кузнецов / Черный кремний, полученный методом ионно-пучкового травления // Тезисы докладов XV Российской конференции по физике полупроводников. Нижний Новгород. – 2022. – С. 18. (стенд)

23. Н.И. Чхало, И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, М.Н. Торопов, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Цыбин, А.Я. Лопатин, А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, Р.М. Смертин, Р.С. Плешков / Высокоапертурный ЭУФ-микроскоп на основе многослойных рентгеновских зеркал с возможностью z-томографии // Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». Нижний Новгород. – 2022. – С.56. (устный)

24. А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало / Изучение влияния углов падения и энергии ионов аргона на шероховатость поверхности основных срезов монокристаллического кремния // Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». Нижний Новгород. – 2022. – С.41. (устный)

25. А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, Н.Н. Салащенко / Программа коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком на основе матричного алгоритма «РМС» // Школа молодых ученых «Современная рентгеновская оптика - 2022». Нижний Новгород. – 2022. – С.70. (стенд)

26. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н. Кумар, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко / Исследование поведения шероховатости поверхности основных

ориентаций монокристаллического кремния при травлении ускоренными ионами инертных газов // Взаимодействие ионов с поверхностью "ВИП-2023". Труды XXVI Международной конференции. Москва, 2023. С. 72-75.

27. И.В. Малышев*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышёв, М.Н. Торопов, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, Р.С. Плешков / Внеосевой асферический коллектор для ЭУФ-литографии и МР-микроскопии // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 868-869 (стенд)

28. М.С. Михайленко*, А.Е. Пестов, М.В. Зорина, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, И.Э. Шевчук / Исследование влияния ионно-пучкового травления на шероховатость поверхности монокристаллического сапфира // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 872-873 (стенд)

29. М.С. Михайленко*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко, Н. Кумар, И.Э. Шевчук / Особенности поведения шероховатости основных ориентаций монокристаллического кремния при травлении ускоренными ионами инертных газов // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 874-875 (стенд)

30. М.В. Зорина, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов*, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Развитие ионно-пучковых методов прецизионной обработки оптических поверхностей // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 884-885 (устный)

31. П.В. Волков, М.В. Зорина, А.Я. Лопатин, А.Ю. Лукьянов, М.С. Михайленко, А. Е. Пестов*, М.Н. Торопов, Д.А. Семиков, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, С.К. Гордеев, В.В. Виткин / Алмазокарбидокремниевый композит «скелетон» как перспективный материал для подложек рентгенооптических элементов // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанofизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 886-887 (устный)

32. И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Анализ формирования кольцевых структур, возникающих на поверхности

оптических элементов в процессе ионно-пучковой обработки // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 913-914 (устный)

33. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Обзор существующих моделей распыления твёрдого тела под действием ионно-пучковой бомбардировки // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 915 (стенд)

34. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Программа по расчёту коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком «РМС» // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 916-917 (стенд)

35. А.И. Артлюхов, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Развитие метода анализа систематической ошибки, возникающей при интерферометрических измерениях // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2023. – т.2. – С. 918-919 (стенд)

36. А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало / Методики прецизионной ионно-пучковой обработки оптических поверхностей // Взаимодействие ионов с поверхностью "ВИП-2023". Труды XXVI Международной конференции. Москва, 2023. С. 96-99.

37. М.В. Зорина*, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, И.В. Малышев, Н.И. Чхало / Исследование влияния ионной обработки ситалла на шероховатость поверхности // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 476-477 (стенд)

38. И.В. Малышев*, Д.Г. Реунов, Н.И. Чхало, М.Н. Торопов, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, А.К. Чернышев / Модернизация зеркального ЭУФ-микроскопа с z-томографией на увеличение 345 крат // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 486-487 (стенд)

39. 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 «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 488-489 (устный)

40. М.С. Михайленко*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев / Вспомогательное программное обеспечение для приложений ионного травления // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 490-491 (устный)

41. 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 «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 507-508 (устный)

42. А.К. Чернышев*, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало / Методики формообразования оптических поверхностей широкоапертурным источником ионов // Материалы XXVIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. – 2024. – С. 541-542 (устный)

43. А.Е. Пестов, А.А. Ахсаханян, П.В. Волков, М.В. Зорина, А.Я. Лопатин, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, П.А. Юнин, С.К. Гордеев / Алмазокарбидокремниевый композит “Скелетон” с технологическим покрытием из поликристаллического кремния, как перспективный материал для подложек рентгеновских зеркал, работающих под мощными пучками СИ // Кремний-2024. Тезисы докладов XV Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе. Иркутск, 2024. С. 55.

44. А.Е. Пестов, М.В. Зорина, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев / Коррекция формы поверхности кристалла-монокроматора из монокристаллического кремния (110) // Кремний-2024. Тезисы докладов XV Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе. Иркутск, 2024. С. 87.

45. А.И. Артюхов*, А.К. Чернышев, Р.А. Шапошников, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало / Разработка метода позиционирования и анализа плоскостно-геометрических габаритов оптических элементов // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 495 (стенд)
46. Е.И. Глушков*, А.К. Чернышев, А.Д. Ахсахалян, Н.И. Чхало / Автоматизированный стенд для измерения формы поверхности крупногабаритных плоских и асферических зеркал на интерферометре типа Физо // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 504 (стенд)
47. Е.И. Глушков*, И.В. Малышев, Д.Г. Реунов, Е.В. Петраков, Н.И. Чхало, А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, Р.А. Шапошников, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, А.А. Ахсахалян, М.В. Зорина, Ю.В. Хомяков, Я.В. Ракшун, В.А. Чернов / Двухзеркальный многослойный монохроматор для синхротронов поколения 4+ // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 504 (устный)
48. И.В. Малышев*, Д.Г. Реунов, А.К. Чернышёв, М.Н. Торопов, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало / Трёхзеркальный ЭУФ-микроскоп 345 крат с z-томографией биологических образцов // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 516 (устный)
49. М.С. Михайленко*, Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.В. Зорина / Изучение поведения шероховатости поверхности монокристаллического германия при облучении пучками ускоренных ионов криптона // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 520 (стенд)
50. А.Д. Ахсахалян, М.С. Михайленко*, Н.И. Чхало, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев / Измерение формы поверхности с помощью низкокoгерентной интерферометрии белого света // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 521 (стенд)

51. А.Е. Пестов*, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, И.Г. Забродин, А.И. Николаев, И.А. Каськов / Установка ионно-пучковой коррекции и асферизации формы поверхности оптических элементов УИП-300 // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 528 (стенд)
52. Д.Г. Реунов*, А.Д. Ахсахалян, Е.И. Глушков, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, Е.В. Петраков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Стенд для аттестации рентгенооптических элементов и систем для синхротронных применений // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 535 (стенд)
53. Д.Г. Реунов*, А.Д. Ахсахалян, Е.И. Глушков, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, Е.В. Петраков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Фокусирующая система Киркпатрика – Баеза для синхротронных применений // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 536 (стенд)
54. М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Методики формопобразования оптических поверхностей широкоапертурным ионным источником // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 547 (стенд)
55. А.А. Ахсахалян, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев*, Н.И. Чхало / Математическое моделирование процесса механической обработки оптических поверхностей // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 548 (стенд)
56. А.А. Назаров*, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, П.А. Юнин / Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния ионами аргона // Материалы XXIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2025. – С. 555 (устный)
57. А.Е. Пестов*, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, Е.И. Глушков, Е.В. Петраков, И.В. Малышев, М.В. Зорина, М.Н. Торопов, А.И. Артюхов, Н.И. Чхало, С.С. Морозов, С.А. Гарахин / Ионно-пучковые методики формирования крупногабаритных подложек

для рентгеновских зеркал скользящего падения // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.13-15. (устный)

58. Д.Г. Реунов*, И.В. Малышев, А.К. Чернышёв, М.Н. Торопов, А.Е. Пестов, Р.С. Плешков, Р.М. Смертин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало / Трёхзеркальный ЭУФ-микроскоп 345 крат с z-томографией биологических образцов // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.30-31. (устный)

59. А.К. Чернышев*, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, Н.И. Чхало, А.И. Артюхов / Разработка метода двухстадийного ионно-пучкового формирования асферичных неосесимметричных оптических поверхностей // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.37-38. (устный)

60. А.К. Чернышев, А.Е. Пестов, М.С. Михайленко*, Н.И. Чхало, А.И. Артюхов, Л.А. Гончаров / Модернизация ионного источника КЛАН-53М для прецизионной обработки рентгено-оптических поверхностей // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.53-54. (стенд)

61. А.И. Артюхов*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.С. Михайленко, И.В. Малышев, Е.И. Глушков, Е.В. Петраков, Н.И. Чхало / Изготовление подложек фокусирующего и ориентационного зеркал на диапазон 20-40 кэВ // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.60-61. (стенд)

62. И.Д. Оськин, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, И.Г. Забродин, Д.С. Дмитриев, Н.И. Чхало / Разработка компактного масс-спектрометра для контроля ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.62-63. (стенд)

63. И.Д. Оськин, М.С. Михайленко*, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, М.Н. Торопов, И.В. Малышев, Н.И. Чхало / Восстановление карты поверхности для тороидальных оптических элементов // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.64. (стенд)

64. Д. Г. Реунов*, А. Д. Ахсахалян, Е.И. Глушков, И.П. Долбня, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, Е.В. Петраков, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало / Фокусирующая система Киркпатрика-Баеза

для синхротронных применений // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.65-66. (стенд)

65. С.А. Гарахин*, С.С. Морозов, И.С. Девятайкин, М.В. Зорина М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Р.А. Шапошников, И.Г. Забродин, И.В. Малышев, Н.И. Чхало / Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации оптики в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах // Труды V школы молодых ученых «Современная рентгеновская и нейтронная оптика». – 2025. – С.67-68. (стенд)