

На правах рукописи

Черн  
Чернышев

Чернышев Алексей Константинович

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

Специальность 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной  
физики»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико – математических наук

Нижний Новгород 2025

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

Научный руководитель: **Пестов Алексей Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией методов прецизионной обработки рентгенооптических материалов ИФМ РАН.

Официальные оппоненты: **Дружин Владислав Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры Лазерные и оптико-электронные системы Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

**Коробейников Николай Геннадьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела прикладной физики физического факультета Новосибирского государственного университета.

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

Защита состоится 29 января 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова" Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

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

<http://www.ipmras.ru>

Автореферат разослан \_\_\_\_ декабря 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН

  
Водолазов Денис Юрьевич

## Общая характеристика работы

### 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 волн излучения накладывает жесткие требования на качество оптических поверхностей. Для достижения дифракционного предела пространственного разрешения [5] в изображающих оптических системах, согласно критерию Марешала [6], точность формы оптической поверхности (по параметру 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 резкому ужесточению требований к качеству отражающих поверхностей коллимирующей и фокусирующей оптики. Угловая ошибка поверхности для таких систем не должна превышать  $1 \cdot 10^{-6}$  рад, что 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 (IBF). Данная технология обеспечивает контролируемое удаление материала с поверхности под действием физического распыления. Ионно-пучковое травление является отработанной технологией, для которой создано специализированное оборудование [4,6,8] и разработан ряд методик [9–11]. Одним из ключевых применений IBF является финишная коррекция асферических рентгенооптических элементов малоразмерным пучком, позволяющая достигать точности формы на уровне долей нанометра [12–15].

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 с глубокой асферизацией поверхности, 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 глубокую асферизацию 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 0.5 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.

### **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 глубокой 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 точности формы поверхности СКО < 1 нм и ангстремную шероховатость). 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 по ионному травлению различных материалов (аморфный и монокристаллический кремний, сапфир) с варьированием параметров ионных пучков: сорт газа ( $\text{Ar}$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Xe}$ ), энергия ионов (300-1500 эВ), ионный ток (0.3-200 мА) и времени экспозиции. Для каждого режима проводилось 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 - Zyglo VeriFire 4, Интерферометр с дифракционной волной сравнения - ИДВС, интерферометр белого света - SuperView W1). Анализ шероховатости микрорельефа поверхности проводился методами атомно-силовой микроскопии (ACM 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 10 локальных ошибок формы поверхности (рентгеново)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 (рентгеново)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 (рентгеново)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 сильноточечного источника ионов.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Работа выполнена на современном оборудовании. Научные положения и результаты диссертации не противоречат результатам других научных групп. Все результаты были представлены в реферируемых научных и специализированных изданиях и докладывались на научных конференциях. По представленным на защиту материалам автором опубликовано 87 работ, из них опубликовано: 19 статей в научных журналах [A1-A19], 65 материалов в сборниках конференций и тезисов докладов [T1-T65], а также имеется 3 патента [П1 – П3].

Апробация содержащихся в данной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях: XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX Международные симпозиумы «Нанофизика 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.

### **Личный вклад 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.

### **Основное содержание работы**

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

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, связанной с необходимостью создания высокоточных оптических

элементов для рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов, где требования к точности формы и шероховатости поверхностей достигают субнанометрового уровня, формулируется цель работы и ставятся задачи исследования, включая разработку математических алгоритмов описания процесса ионно-пучковой коррекции формы, модернизацию установки и внедрение новых метрологических подходов. Практическая значимость работы обосновывается востребованностью результатов работы для современных источников жесткого рентгеновского излучения, в частности синхротрона поколения 4+ “СКИФ”, проекционной ЭУФ литографии, рентгеновской астрономии и микроскопий. Кроме того, во введении сформулированы положения, выносимые на защиту и научная новизна исследования, обозначен личный вклад автора и приведена структура диссертации и список публикаций по теме.

**В первой главе** приводится обзор литературы по тематике исследования, 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 удалено эволюции метода IBF, начиная с первых работ (80е годы XX века) до современных систем, обеспечивающих точность формы на уровне СКО  $<1$  нм. Значительное внимание удалено анализу факторов, влияющих на качество обработки: стабильность ионного пучка, точность позиционирования, алгоритмы расчета времени экспозиции. Отдельный параграф посвящен методам контроля формы и шероховатости, обеспечивающих достижение прецизионного качества оптических поверхностей.

**Во второй главе** описываются экспериментальные исследования взаимодействия ионного пучка. В том числе приводятся результаты серии экспериментов по изучению коэффициента распыления и эволюции микроБероховатости различных материалов потенциально применимых в качестве подложек для многослойных рентгеновских зеркал, таких как монокристаллический кремний и сапфир. В ходе экспериментов для монокристаллического кремния была выявлена сильная зависимость процесса ионного травления от кристаллографической ориентации и параметров ионного пучка (рис.1). Важным результатом стало обнаружение порогового характера (рис.1а) зависимости шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии распыляющих ионов: найдены значения энергии ионов, ниже которых шероховатость поверхности деградирует с образованием кратеров, а при энергиях выше

пороговой происходит эффективное сглаживание. В частности, для ориентации  $<100>$  и ионов Ar оптимальная энергия, обеспечивающая высокий коэффициент распыления и минимальную шероховатость, составила около 800 эВ. Эти исследования позволили определить параметры ионного пучка, которые легли в основу разработанных в рамках исследования методик финишной обработки поверхностей подложек рентгеновских зеркал.

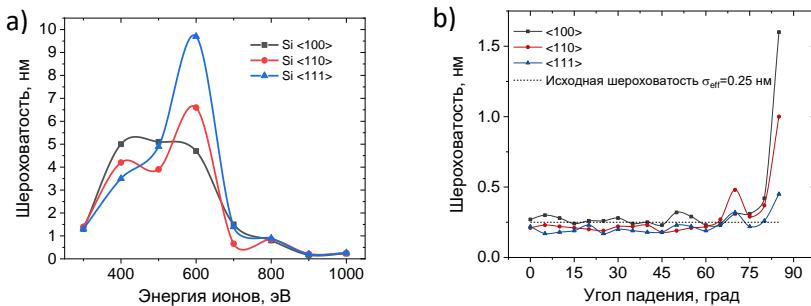


Рис.1. Зависимость эффективной шероховатости поверхности основных ориентаций монокристаллического кремния от энергии (а) и угла падения (б) ионов.

Для монокристаллического сапфира экспериментально было показано снижение микротекстуры в результате ионно-пучковой обработки аргоном. Исследование зависимости от угла падения показало стабильность шероховатости в диапазоне углов падения ионов  $\pm 40^\circ$  (рис.2б), что делает возможным использование данной методики для проведения процедуры глубокой асферизации элементов со значительной кривизной поверхности широким квазипараллельным ионным пучком. Полученная скорость травления  $\sim 23$  нм/мин (рис.2а) подтверждает применимость технологии ионно-пучковой коррекции локальных ошибок формы для обработки сапфира.

Основываясь на результатах проведённого исследования и прообразе установки, описанной в [16], была разработана и создана новая установка ионно-пучковой обработки, главной особенностью которой стало применение трёх источников ионов в единой вакуумной камере с пятикоординатной системой позиционирования образца. В состав установки вошли широкоапертурный источник ионов КЛАН-163М для полировки и асферизации через профилирующие маски, а также два модернизированных в рамках работы фокусирующих источника ионов КЛАН-53М и КЛАН-12М.

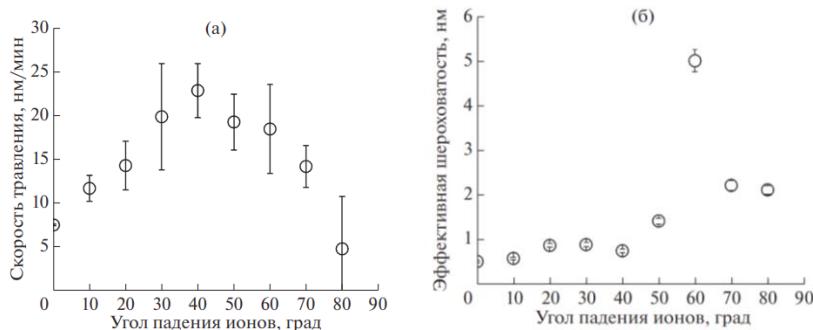


Рис. 2. (а) Экспериментальная зависимость скорости травления монокристаллического сапфира от угла падения ионов аргона; (б) экспериментальная зависимость значения эффективной шероховатости поверхности монокристаллического сапфира от угла падения ионов аргона

Модернизация источников заключалась в замене плоских ионно-оптических систем на вогнутые фокусирующие, что позволило полностью отказаться от обрезающих ионный пучок диафрагм, исключив тем самым загрязнение поверхности продуктами эрозии, и значительно повысить плотность тока ионов. Ключевым преимуществом установки стала возможность проведения полного технологического цикла, включающего полировку, асферизацию и финишную коррекцию локальных ошибок формы, без нарушения вакуума, что гарантирует сохранение чистоты процесса на всех этапах обработки.

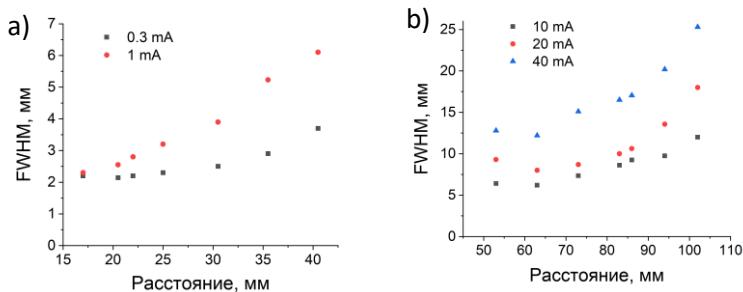


Рис. 3. Зависимость полуширины кратера травления от расстояния “источник–образец” для источника КЛАН-12М (а) и КЛАН53М (б)

Для каждого из источников были проведены измерения пространственного распределения скорости ионного травления (рис.3). Эти данные являются фундаментальной основой для последующих математических алгоритмов расчёта коррекции формы поверхности.

Собранный ионно-пучковая установка позволяет обрабатывать крупногабаритные оптические элементы диаметром до 320 миллиметров. Минимальный размер сфокусированного ионного пучка был снижен до 2.1 миллиметра, что позволяет корректировать ошибки формы поверхности с пространственной частотой более  $9.5 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>-1</sup>. При этом диапазоны размеров пучков двух фокусирующих источников перекрываются, создавая непрерывный технологический ряд для коррекции ошибок формы поверхности больших латеральных масштабов.

**В третьей главе** диссертационной работы представлены разработанные и усовершенствованные методы ионно-пучковой обработки оптических поверхностей с использованием широкоапертурного сильноточного (ток ионов до 200 мА) источника ионов (рис.4).



Рис.4. Схема осесимметричной обработки поверхности. 1. Широкоапертурный источник ионов; 2. Квазипараллельный ионный пучок; 3. Формирующая диафрагма; 4. Профилированный ионный пучок после диафрагмы; 5. Образец

Для существующего метода ионно-пучковой осесимметричной полировки была решена проблема неконтролируемого изменения глубины травления вблизи оси вращения заготовки, вызванное трудностью точного совмещения края формирующей маски с осью вращения. Вместо сложной юстировки был предложен альтернативный подход, заключающийся в смещении оси вращения заготовки на склон распределения плотности ионного тока. Это позволило использовать маску с полностью открытой центральной областью, что исключило возникновение дефектов вблизи оси вращения. Экспериментальная проверка метода на сферической кремниевой подложке подтвердила его эффективность: было продемонстрировано равномерное травление с отклонением около 1% по параметру PV (Peak-to-Valley) и значительное улучшение шероховатости с 0.33 нм до 0.15 нм. Данное решение упрощает технологический процесс и

расширяет возможности изготовления высокоточной рентгеновской оптики, в частности, для элементов без центрального отверстия.

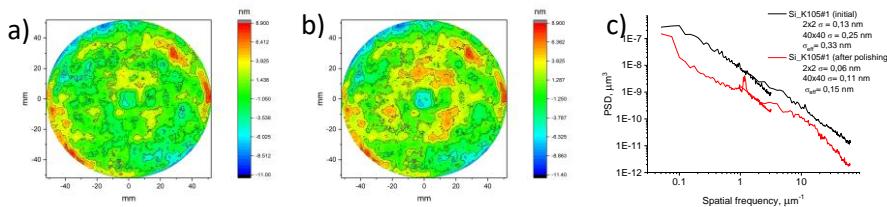


Рис. 5. Карты отклонения формы поверхности от идеальной сферы до (а) и после (б) ионно-пучковой полировки. PSD функция шероховатости до и после ионной полировки (с)

Предложен технологический метод компенсации aberrаций волнового фронта с использованием широкоапертурного сильноточечного источника, основывающийся 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 счет переменной скорости вращения заготовки, что позволяет создавать корректоры волнового фронта для компенсации оптических aberrаций.

Отдельным значимым результатом главы является разработка методов формообразования поверхностей для оптики скользящего падения. Представлена методика изготовления высокоточных торOIDальных зеркал путем ионно-пучкового травления цилиндрических заготовок через рассчитанную диафрагму при их линейном и равномерном перемещении. На опытном образце из исходного цилиндра была сформирована торOIDальная поверхность. При глубине травления 31 мкм была достигнута точность формы на уровне 0.5% по параметру PV.

Для создания крупногабаритных цилиндрических поверхностей (превышающих размер ионного пучка) с произвольной образующей (например, параболической) был предложен и реализован метод, основанный на перемещении заготовки позади щелевой диафрагмы с переменной скоростью. Апробация метода была проведена при изготовлении подложек зеркал для коллимирующей системы Киркпатрика-Баэза, состоящей из пары параболических цилиндров с отклонением от плоскости 1,1 и 1,3 мкм. Точность изготовления формы составила СКО ~ 3,0 нм, а угловая ошибка - ±1 мкрад.

**В четвертой главе** диссертационной работы представлено развитие методов ионно-пучкового формообразования с использованием малоразмерного сфокусирующего ионного источника (рис.6.), которые решают наиболее сложную задачу - прецизионную коррекцию локальных ошибок формы и создание высокоточных оптических поверхностей произвольной геометрии.

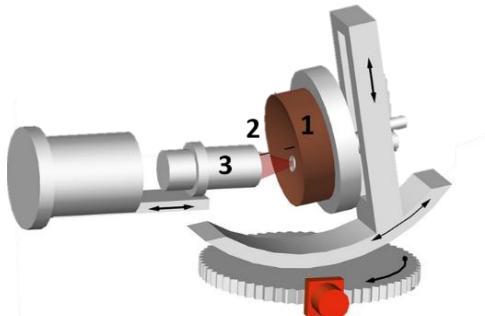


Рис.6. Схема коррекции локальных ошибок формы. 1. Образец; 2. Сфокусированный ионный пучок; 3. Фокусирующий ионный источник

Теоретической основой послужила математическая модель, представляющая процесс удаления материала в ходе ионного травления как свертку функции пучка и карты времени экспозиции. В формализме дискретной модели было продемонстрировано существование решения для любой пары «пучок–поверхность», что означает принципиальную возможность достижения нулевого отклонения формы ( $СКО = 0$ ). Однако задача является плохо обусловленной, и прямое решение приводит к неприемлемо большим временам обработки и является неустойчивым к погрешностям данных. В связи с этим была сформулирована задача оптимизации с граничными условиями, описывающая коррекцию локальных ошибок формы оптической поверхности малоразмерным ионным пучком в дискретном представлении. Был разработан и реализован практический алгоритм, основанный на решении задачи оптимизации методом градиентного спуска. Данный алгоритм находит компромиссное решение, минимизирующее среднеквадратичное отклонение ( $СКО$ ) поверхности при ограничении на общее время обработки. Важным преимуществом предложенного подхода является отсутствие на результирующей поверхности детерминированных ошибок с характерным масштабом размера ионного пучка, что наблюдается в других методах. Моделирование показало, что алгоритм эффективно снижает амплитуду неоднородностей, латеральный размер которых вдвое меньше размера

пучка, что позволяет выбирать соответствующий источник для коррекции ошибок определенной пространственной частоты.

Экспериментальная проверка методики подтвердила ее эффективность. На примере изготовления плоских подложек была продемонстрирована возможность достижения субнанометровой точности формы: после коррекции пучком диаметром 2.1 мм (источник КЛАН-12М, ток ионов 0,3-1 мА) значения СКО составили 0.7 нм и 0.68 нм (рис.7) для двух образцов. Метод также успешно применен для финишной коррекции сферической подложки, где значение СКО было улучшено с 3.2 нм до 0.9 нм.

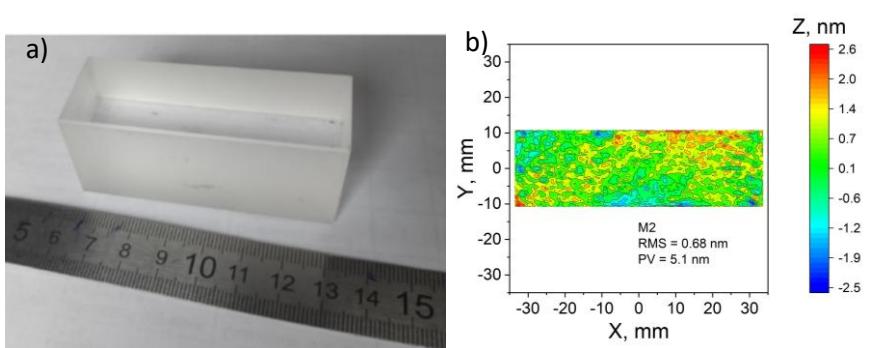


Рис.7. Фотография подложки (а) и карта ошибок формы поверхности после коррекции локальных ошибок формы(б)

Другим приложением метода стала демонстрация возможности формирования оптической поверхности свободной формы - внеосевого коллектора излучения с размахом высот 36.3 мкм. Для этого был использован более производительный источник КЛАН-53М (ток ионов до 40 мА).

Отдельной важной разработкой, представленной в главе 4, является создание оптического контурографа для решения проблемы точного позиционирования заготовки в установке. Моделирование показало, что систематическая ошибка позиционирования приводит к возникновению высокочастотных ошибок формы поверхности и прекращению улучшения СКО после нескольких итераций ионной обработки. Контурограф, основанный на сканировании лазерным лучом и регистрации отражения от края оптической поверхности, позволил определять положение заготовки с точностью до 2.5 мкм. Его применение при изготовлении подложки для монохроматора синхротрона СКИФ позволило выявить и скорректировать смещение в 0.41 мм и в итоге

достичь требуемого уровня точности формы ( $\text{СКО} = 1.0 \text{ нм}$ ), что было невозможно без точной юстировки.

**В заключении** подведены итоги работы, сформулированы основные выводы и перспективные направления дальнейших исследований.

В рамках диссертационной работы было проведено комплексное развитие ионно-пучковых методов для формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики. Созданная установка с тремя специализированными ионными источниками и концепцией подвижной детали позволяет проводить полный цикл обработки от полировки и асферизации до коррекции локальных ошибок формы для оптических элементов диаметром до 320 мм. Модернизация источников обеспечила непрерывный диапазон изменения диаметра ионного пучка (от 2,1 до 25 мм) и токов (от 0,3 до 40 мА), что позволяет формировать высокоточные поверхности произвольной формы.

Существенно расширен класс решаемых задач: разработаны и реализованы методики изготовления корректоров волнового фронта, осесимметричной коррекции для элементов произвольной геометрии и формирования оптики скользящего падения (тороиды, цилиндры).

Развитие математического аппарата показано существование решения задачи коррекции для любой пары «пучок–поверхность», а для практического применения предложен эффективный оптимизационный алгоритм. Для обеспечения высокой точности обработки изготовлен контурограф, обеспечивающий юстировку заготовки с точностью до 2,5 мкм.

В итоге, проведённая работа создала комплексный научно-технологический задел для производства высокоточной рентгенооптики. Разработанные методы и оборудование представляют собой комплекс технологических решений для высокоточной обработки широкого класса оптических и рентгенооптических элементов и открывают возможность изготовления элементов с дифракционным качеством для установок класса «мегасайенс», ЭУФ-литографии и рентгеновской микроскопии. В совокупности, результаты работы демонстрируют создание полной технологической цепочки — от строгой математической модели и эффективного алгоритма до практической реализации и решения вспомогательных метрологических задач — для прецизионного изготовления и коррекции оптических поверхностей любого уровня сложности.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

- 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.Н. 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.Н. 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 (контуограф) / Артюхов А.И., Глушкин 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.

## **Список литературы**

1. H.J. Levinson, Jpn. J. Appl. Phys., 61, SD0803 (2022). DOI: 10.35848/1347-4065/ac49fa
2. C. Hoffman, T.G. Giallorenzi, L.B. Slater, Appl. Opt., 54(31), F268 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.00F268
3. Y. Platonov, J. Rodriguez, M. Kriese et al., Proc. SPIE, 8076, 80760N-2 (2011). DOI: 10.1117/12.889519
4. I.V. Malyshev, D.G. Reunov, N.I. Chkhalo et al., Opt. Express, 30(26) 47567 (2022). DOI: 10.1364/OE.475032
5. M. Born, E. Wolf, “Resolving power of image-forming system,” in Principles of Optics, (Cambridge University, 1999), Sec. 8.6.2, p. 461.
6. M. Born and E. Wolf, “Tolerance conditions for primary aberrations,” in Principles of Optics (Cambridge University, 1999), Sec. 9.3, p. 528.
7. T. Wang, L. Huang, Y. Zhu et al., Nanomanufacturing and Metrology, 6, 20 (2023). DOI: 10.1007/s41871-023-00200-x
8. Y. Platonov, J. Rodriguez, M. Kriese et al., Proc. SPIE, 8076, 80760N-2 (2011). DOI: 10.1117/12.889519
9. I.V. Malyshev, D.G. Reunov, N.I. Chkhalo et al., Opt. Express, 30(26) 47567 (2022). DOI: 10.1364/OE.475032
10. М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко и др., УФН, 182(7), 727 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201207c.0727
11. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo et al., Proc. SPIE, 6921, 69210Q (2008). DOI: 10.1117/12.772435
12. J. Polak, E. Klepetkova, J. Pošmourň et al., Proc. SPIE, 9442, 944212-1 (2014).. DOI: 10.1117/12.2175899
13. T. Wang, L. Huang, M. Vescovi et al., Opt. Express, 29(23), 38737 (2021) 10.1364/OE.443346
14. W. Gu, J. Yu1, P. Sheng et al., Research in Astronomy and Astrophysics, 23(11), 115016 (2023). DOI: 10.1088/1674-4527/acf6b0
15. W. Junlin, Proc. SPIE, 8416, 841609-1 (2012). DOI: 10.1117/12.975832
16. N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, et al., Prec. Eng., 48, 338 (2017).

*Чернышев Алексей Константинович*

Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных  
поверхностей для рентгеновской оптики

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

Подписано к печати 06.11.2025

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур Российской  
академии наук — филиала Федерального государственного бюджетного  
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт  
прикладной физики Российской академии наук»

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