

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Чернышева Алексея Константиновича **«Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

В последнее время передовые исследования и передовые технологии упираются в фундаментальные физические ограничения разрешающей способности оптических систем, которая определяется длиной волны используемого излучения. Наличие дифракционного предела разрешения стало основной причиной перехода в область мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазонов электромагнитного излучения. Развитие рентгеновской оптики становится основным направлением развития одних из самых значимых технологических и научных направлений, таких как проекционная ЭУФ-литография, рентгеновская астрономия и микроскопия, и т.д. Однако уменьшение «длины волны» порождает ряд ограничений – для достижения дифракционного предела разрешающей способности в МР и ЭУФ диапазонах качество формы оптических поверхностей должно быть много лучшим, чем в видимом. Требования к точности формы оптической поверхности составляет менее 1 нанометра по параметру среднеквадратичной ошибки (СКО) формы и менее 0,3 нанометра по параметру шероховатости. Данные требования должны выполняться в том числе для сложных асферических поверхностей, размер которых может составлять сотни миллиметров.

Основной методикой, обеспечивающей высокую точность формы и низкую шероховатость, является ионно-пучковое травление (IBF – ion beam figuring), как один из наиболее перспективных и детерминированных методов финишной коррекции оптических поверхностей. Его актуальность обусловлена сочетанием характеристик: возможность контролируемого удаления материала на глубину единиц – долей нм, отсутствие механического контакта и износа инструмента, а также применимость к широкому классу материалов, включая оптические стекла, кварц и кремний.

Диссертационная работа Чернышева А.К. сфокусирована на расширение возможностей процедуры ионно-пучкового травления и преодолении ключевых проблем для выхода на стабильный субнанометровый уровень точности в ходе ионно-пучковой обработки, что подчеркивает ее **актуальность и значимость**.

В диссертационной работе автор последовательно и корректно проводит исследование процесса физического распыления перспективных для применения в рентгеновской оптике материалов, на основании которого разрабатывает установку ионно-пучкового травления с тремя источниками ионов, на которой проверяет работоспособность разработанных методик высокоточной ионно-пучковой полировки, асферизации и коррекции формы оптических элементов. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы с перечнем публикаций автора. Диссертация изложена на 162 страницах и содержит 94 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, формулируются цели и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе автор приводит литературный обзор современных методов формирования прецизионных оптических элементов, проводя сравнение их достоинств и недостатков. По результатам сравнения делается вывод, что ионно-пучковое травление является наиболее востребованным методом благодаря своей чистоте, воспроизводимости и способности обеспечивать высокое качество как формы, так и шероховатости поверхности. Затем в тексте рассматриваются физические принципы распыления материала подложки под действием бомбардировки ускоренными ионами. Прослеживается эволюция процесса ионно-пучковой обработки поверхности оптических элементов с 1980-х годов до наших дней, и обосновываются существующие проблемы и ограничения данного метода.

Во второй главе значительное внимание уделено изучению физического процесса ионного распыления оптических материалов. Проведено комплексное исследование распыления ионами благородных газов (Ar, Ne, Xe) монокристаллического кремния кристаллографических ориентаций $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и монокристаллического сапфира (а-срез). Методика включала измерение коэффициента распыления по высоте, формирующейся в результате ионного распыления, ступеньки и анализ эволюции микрошероховатости, контроль которой осуществлялся методом атомно-силовой микроскопии и вычисления эффективной шероховатости (σ_{eff}) через функцию спектральной плотности мощности (PSD). В рамках исследования удалось определить оптимальные режимы ионно-пучковой обработки, обеспечивающие получение поверхности с шероховатостью $\sigma_{\text{eff}} < 0,3$ нм для кремния и сапфира, что критически важно для задач оптики рентгеновского диапазона длин волн. На основе проведенных исследований была разработана и создана универсальная установка ионно-пучкового травления, объединяющая три функции в одном вакуумном объеме: ионная полировка и асферизация широкоапертурным сильноточным источником и итерационная коррекция

локальных ошибок формы модернизированными в рамках работы фокусирующими источниками.

В третьей главе представлены предложенные автором оригинальные методики ионно-пучковой обработки оптических поверхностей широкоапертурным ионным источником. Основное внимание уделено развитию метода осесимметричной обработки, основанной на вращении заготовки за профилирующей диафрагмой для полировки, асферизации и коррекции формы. Для решения проблемы неоднородного травления вблизи оси вращения предложен и экспериментально подтвержден метод смещения оси вращения заготовки относительно центра ионного пучка. Также описано применение осесимметричной обработки для коррекции осесимметричных ошибок формы, в том числе некруглых деталей. Наиболее значимым представляется предложенная методика формирования неосесимметричных профилей, описываемых полиномами Цернике, за счет последовательной комбинации методов с постоянной и переменной скоростью вращения. Предложенный метод позволяет корректировать стандартные aberrации типа кома, астигматизм и т.п., часто возникающих в процессе сборки оптических схем. Кроме того, представлены методы формирования рентгенооптических элементов скользящего падения: изготовление тороидальных поверхностей из цилиндрических заготовок и создание протяженных цилиндрических поверхностей с произвольной образующей путем линейного перемещения заготовки с переменной скоростью в ионном пучке.

В четвёртой главе рассматривается задача коррекции локальных ошибок формы оптических поверхностей с помощью малоразмерного ионного пучка. Разработана теоретическая модель процесса, описывающая удаление материала как свёртку функции удаления пучка и карты времени экспозиции. Показано, что для дискретного представления существует точное математическое решение, однако на практике оно часто требует недопустимо больших времен обработки. Для практического применения предложен оптимизационный алгоритм на основе метода градиентного спуска. Этот алгоритм ищет компромиссное решение, минимизирующее среднеквадратичное отклонение (СКО) обработанной поверхности за заданное ограниченное время. Моделирование подтвердило, что метод эффективно снижает амплитуду неоднородностей, размер которых может быть вдвое меньше диаметра пучка. Экспериментально методика была успешно применена для финишной коррекции различных элементов, включая подложки для системы Киркпатрика-Баеза и сферическое зеркало рентгеновского микроскопа, позволив достичь субнанометровой точности ($\text{СКО} \sim 0.7 \text{ нм}$).

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, посвящённой развитию ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики. В том числе отмечены результаты исследования распыления оптических материалов, которые легли в основу разработанной установки ионно-пучковой обработки оптических элементов, а также кратко описаны непосредственно развитые в рамках работы методики и произведенные для их реализации модификации источников ускоренных ионов.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы Чернышева А.К. следует отнести:

- Экспериментально установлены оптимальные режимы ионно-пучкового распыления монокристаллических сапфира и кремния, обеспечивающие заметную скорость удаления материала и минимальную шероховатость поверхности: для монокристаллического кремния определена пороговая энергия ионов, обеспечивающая сглаживание шероховатости; для сапфира оптимальные энергия ионов и диапазон углов падения.
- Разработана и создана многофункциональная установка для ионно-пучковой обработки оптических элементов диаметром до 320 мм. Установка оснащена тремя специализированными источниками ионов (широкоапертурный и два фокусирующих), что позволяет в рамках одной системы осуществлять полировку, асферизацию через диафрагму и коррекцию локальных ошибок формы. Модификация источников КЛАН-12М и КЛАН-53М с фокусирующими ионно-оптическими системами обеспечила непрерывный диапазон изменения диаметров пучка от 2.1 до 25 мм и тока ионов от 0.3 до 40 мА, что позволяет обрабатывать поверхности любых форм и размеров с контролируемым удалением материала на глубину от долей нанометра до десятков микрон.
- Существенно расширен функционал методики ионно-пучковой обработки широкоапертурным сильноточным источником, в том числе предложены и реализованы методики осесимметричной коррекции формы, формирования элементов скользящего падения и корректоров волнового фронта.
- Развита математический аппарат, позволяющий за конечное время достигать заданной точности в ходе коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком. Для обеспечения высокой точности обработки создан контурограф, обеспечивающий позиционирование образца с точностью до 2.5 мкм. В совокупности результаты работы обеспечивают возможность изготовления

высокоточных (СКО менее 1 нм) оптических и рентгенооптических элементов с произвольной формой поверхности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы

Обоснованность полученных научных результатов и выводов обеспечивается корректной методологией исследования и репрезентативностью экспериментальных данных. Примененные методики являются научно обоснованными и полностью соответствуют поставленным задачам. Эксперименты выполнены на современном оборудовании, что гарантирует высокую точность и воспроизводимость полученных результатов. Результаты работы согласуются с известными научными фактами и данными других исследователей.

Материалы диссертации были представлены на международных и российских конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

В отношении работы Чернышева А. К. можно отметить следующие аспекты, требующие дополнительного пояснения:

1. На стр. 4., стр. 15, стр. 86, стр. 114, стр. 115.

Указано: «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».

Замечание: Критерий Марешаля относится непосредственно к волновому фронту, сформированному оптической системой, а не к форме поверхности. Погрешности поверхности переносятся на волновой фронт с определенным коэффициентом в зависимости от оптической схемы (например, удваиваются при отражении от зеркала по нормали). Следовательно, требования к точности самой поверхности (СКО) должны быть, как минимум, вдвое строже ($\lambda/28$ для отражающего элемента), что делает утверждение на стр. 4 и др. неточным.

2. На стр. 9. Анализ точности формообразования.

Замечание: Автор анализирует точность изготовления зеркал для экстремального ультрафиолета (ЭУФ) с помощью интерферометров видимого диапазона (Физо - Zygo VeriFire 4, Интерферометр с дифракционной волной сравнения - ИДВС, интерферометр белого света - SuperView W1). При этом отсутствует исследование и обсуждение методов оценки качества непосредственно в рабочем диапазоне длин волн (11.2 нм). Также не приведены результаты испытаний изготовленных зеркал по их прямому назначению – в составе реальных оптических схем или стендов, работающих в ЭУФ-диапазоне.

3. На стр. 10. Положение, выносимое на защиту.

Указано: «...алгоритм ... обеспечивает коррекцию ошибок ... с латеральными размерами $\geq d/2$ ».

Замечание: Для полноты описания необходимо конкретизировать диаметр пучка d . Следует указать типовое значение (или диапазон значений) диаметра используемого малоразмерного ионного пучка (например, 1 мм, или в диапазоне 1-5 мм), чтобы оценить минимальный размер корректируемой ошибки.

4. На стр. 22. Обзор материалов.

Указано: «Ионно-пучковая обработка широко применяется при изготовлении высокоточных подложек из аморфных материалов, например, SiO₂, Zerodur, ULE».

Замечание: В обзоре не рассмотрена возможность применения современных отечественных материалов, аналогичных перечисленным, таких как Астроситалл марки СО-115М (см., например, Поздняков В. Г., Рязанов В. А., Жуков А. В. Исследование влияния плотности ионного тока на образование дефектов на поверхности ситалла при ионно-лучевой обработке // Машиностроение и компьютерные технологии. 2015. №6.).

5. На стр. 39. Анализ перспективных материалов.

Указано: «...наиболее перспективными материалами ... является монокристаллический кремний, а для космических применений перспективным материалом является сапфир».

Замечание: Данный вывод противоречит данным, представленным в самой Таблице 2.1, где бериллий (Be) имеет максимальное значение удельной жесткости ($E/\rho = 162$ ГПа·см³/г), что является ключевым для космических применений. Утверждение о сапфире требует более подробного обоснования, объясняющего, почему он выбран по сравнению с бериллием (например, из-за технологичности, стабильности, отсутствия токсичности и т.д.).

6. К рис. 2.1, 2.2, 2.3 и таблице 2.2.

Замечание: В подрисуночных подписях и таблице неполно описаны условия эксперимента. В частности:

Неясно, как обеспечивался угол падения ионов $\theta = 90^\circ$ (рис. 2.1-2.3), если в таблице 2.2 указан диапазон изменения угла $\pm 35^\circ$. Требуется пояснение геометрии эксперимента.

7. На стр. 55. Форма исследуемой поверхности.

“Для этого задаются полярные координаты точки (ω и ρ), а также выбирается стрелка прогиба (X) по формуле 2.1. Для установки локальной нормали в данной точке производится наклон образца 2.2:”.

Замечание: Формулы 2.1 и 2.2 приведены для случая сферической поверхности. В диссертации же заявлена обработка асферических и поверхностей произвольной формы.

Необходимо представить или сослаться на общие уравнения для вычисления стрелки прогиба и угла нормали для поверхности произвольной формы, либо пояснить, как предложенный упрощенный подход применим к асферическим поверхностям.

8. На стр. 53. Описание установки (рис. 2.18).

Замечание:

Кинематическая схема пятиосевого стола (рис. 2.18б) представлена недостаточно подробно. Для понимания преобразований координат необходим детализированный рисунок с указанием: систем координат детали, установки, направления линейных и угловых перемещений. Без этого затруднен анализ кинематики и точности позиционирования.

В тексте отсутствует обоснование разработки собственной конструкции позиционирующего устройства. Нет сравнительного анализа с существующими коммерческими решениями (например, гексаподами) по ключевым параметрам: точность позиционирования и ориентации, динамический диапазон, сложность кинематических преобразований.

9. На стр. 74. Особенности обработки вблизи оси вращения.

Замечание: Предложенная методика решения проблемы особой точки экспериментально проверена только для сферической поверхности. Однако для асферической поверхности задача усложняется, так как требуется точное совмещение не только вершины (точки с нулевым градиентом), но и оси вращения заготовки с осью пучка, что включает в себя компенсацию не только поперечной децентрировки, но и наклона оси. Необходимо обсудить применимость предложенного подхода к асферическим поверхностям или обозначить это как направление дальнейших исследований.

10. На стр. 86. Описание формы поверхности.

Замечание: При реализации коррекции формы автор ограничивается разложением по полиномам Цернике. Хотя это распространенный метод, следовало бы обсудить альтернативные способы математического описания поверхности (например, параметрические уравнения формы поверхности, описание через конгруэнцию нормалей и тд), их преимущества, недостатки и применимость для решения задач ионно-пучковой коррекции.

11. На стр. 122. Представление формы внеосевого элемента (рис. 4.11б).

Замечание: Отклонение формы представлено от ближайшей сферы. Однако для внеосевых элементов более наглядным и эффективным с точки зрения планирования обработки может быть представление отклонения от более сложной базовой поверхности, например, ближайшего асферического поверхностного вращения второго порядка. Это

может привести к более монотонному и предсказуемому распределению удаляемого материала $R(x,y)$. Целесообразно провести такое сравнение и обосновать выбор базовой поверхности.

12. На стр. 125. Описание контурографа (рис. 4.17).

Замечание: Конструкция предложенного контурографа, судя по схеме, не предусматривает наклона его измерительной оси для установки по нормали к локальному участку контролируемой поверхности. Это может являться причиной ограниченной точности измерения особенно для поверхностей с заметной кривизной или асферичностью.

Незначительные неточности и недочеты оформления:

- На стр. 6, 11, 39. Формулировка цели работы. В тексте диссертации встречаются различные, не полностью идентичные формулировки цели работы (“Формулируется цель работы – разработка методов ионно-пучковой обработки, обеспечивающих дифракционное качество оптики. 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”).
- Нарушение единства терминологии. В тексте используются разные варианты названия основного процесса: «Ионно-пучковая обработка» (глава 1.2.4) и англоязычная аббревиатура «IBF» (глава 1.3).
- На стр. 29: «Общий размер требуемого движения (???) и камеры...». Предложение содержит опечатку («движения») и неясное место. Требуется корректировка: «Общий размер рабочей камеры...».
- На стр. 39, Таблица 2.1: отсутствует расшифровка обозначений некоторых параметров. Не для всех параметров указана размерность. Требуется дополнить таблицу.
- На стр. 72, Рис. 3.1: В подрисуночной подписи указана позиция «6. Пятиосная система позиционирования», которая отсутствует на самом рисунке. Необходимо исправить рисунок или подпись.

Отмеченные вопросы носят уточняющий характер и не влияют на общую положительную оценку исследования. Диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование, содержащее новые результаты, имеющие научное значение и практическую ценность.

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ в рецензируемых журналах из перечня ВАК, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus, а также получено 3 патента Российской Федерации.

Автореферат точно и полно отражает содержание диссертации.

Тема диссертационной работы Чернышева А.К. «Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики», её цели, задачи и методы их решения соответствуют специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики». Работа удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 11.09.2021), а её автор, Чернышев А.К., заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»
Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана
Адрес: Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 4
Телефон: + 7 499 263 63 80
e-mail: druzhin@bmstu.ru

дата 13.01.2026

Дружин Владислав Владимирович

Согласен на обработку персональных данных.

дата 13.01.2026

Дружин Владислав Владимирович

Подпись Дружина Владислава Владимировича заверяю

дата 13.01.2026

ФИО, должность



Подпись специалиста по персоналу:
Шагабудинов И. В.