

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, ГСП-1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: +7 (499) 135 14 29
 +7 (499) 132 65 54
Телефакс: +7 (499) 135 78 80
E-mail: office@sci.lebedev.ru
www.lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
по научной работе,
доктор физико-математических наук,
профессор
Савинов Сергей Юрьевич



« 04 » декабря 2025 года

ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Развитие современных технологий, науки и техники требует повышения качества оптических элементов и систем. За последние 10-15 лет требования к точности формы и шероховатости поверхности перешли в субнанометровую область. В первую очередь, это связано с использованием коротковолновых диапазонов длин волн: вакуумного ультрафиолетового (ВУФ, длины волн 100-200 нм), экстремального ультрафиолетового (ЭУФ, длины волн 10-100 нм), мягкого рентгеновского (МР, длины волн 1-10 нм) и жесткого рентгеновского (ЖР, длины волн 1-0,03 нм) излучения. В этих спектральных диапазонах решаются многие фундаментальные и прикладные задачи. В частности, активно развиваются новые технологии создания устройств микроэлектроники методом ЭУФ-литографии, разрабатывается рентгеновская микроскопия в области мягкого рентгеновского излучения. В связи с модернизацией синхротронов 3-го поколения и строительством новых синхротронов поколения 4 и 4+, а также рентгеновских лазеров на свободных электронах крайне актуальной является решение проблемы гладкости и точности формы поверхностей зеркал для пользовательских каналов этих научно-исследовательских комплексов.

Невысокий коэффициент отражения в МР и ЭУФ диапазонах требует минимизировать число используемых элементов в рентгенооптической системе, что, в

свою очередь, требует асферизации оптических плоскостей: часто возникает необходимость в сложной асферической оптике 4, 6 и более высоких порядков. Рентгеновская оптика скользящего падения также включает в себя элементы сложной формы поверхности: эллипсоиды, параболоиды и т.п.

В диссертационной работе А.К. Чернышева обосновывается, что в наибольшей степени требованиям методов обработки оптических поверхностей, сочетающих в себе высокую точность удаления материала, позитивное влияние на шероховатость, высокую производительность и низкую стоимость технологического процесса, удовлетворяет ионно-пучковое травление (ИПТ). ИПТ – это бесконтактный метод обработки поверхности, основанный на физическом явлении распыления материала с поверхности под воздействием ионной бомбардировки.

В результате работы А.К. Чернышева разработаны новые методики и оборудование, позволяющие существенно расширить возможности ионно-пучковой технологии при изготовлении перспективных оптических элементов и систем для решения современных задач науки и промышленности, что делает тематику диссертации **актуальной и востребованной**.

А.К. Чернышев провёл исследование процессов ионного распыления и создал физико-математическую модель ИПТ с учётом особенностей движения обрабатываемой поверхности, что позволило разработать ряд новых методик формирования глубоких асферических профилей. С применением различных источников ионов как с фокусировкой ионного пучка, так и широкоапертурных сильноточных источников с квазипараллельным пучком, удалось изготовить сложные асферические поверхности, в том числе, не обладающие осевой симметрией и с профилированием вдоль одной или двух осей в плоскости, перпендикулярной плоскости падения излучения. Исследования и разработки А.К. Чернышева при решении поставленных перед ним прикладных задач привели к созданию универсальной установки прецизионной ионно-пучковой обработки оптических деталей, которая не только позволяет формировать требуемый профиль оптических деталей, но и улучшает точность формы поверхности до уровня лучше 1 нм (СКО) и снижает её шероховатость до уровня менее 0,2 нм (СКО).

Диссертационная работа А.К. Чернышева состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и публикаций автора диссертации. Общий объем диссертации оставляет 162 страницы, 94 рисунка, 4 таблицы.

Во введении отмечается важность и значимость исследований процессов ионного распыления в целях реализации методики точной ионно-пучковой обработки оптических поверхностей. Обосновывается актуальность темы диссертации, перечисляются задачи

исследования, цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации.

Первая глава диссертации является обзорной и подготовлена на основе большого числа публикаций по тематике работы. В ней описываются методы, применяемые в современной оптической промышленности для изготовления прецизионных элементов, в том числе, оптики коротковолнового диапазона длин волн. Указываются достоинства и недостатки различных методов полировки и коррекции формы поверхности, значительное внимание уделено современному состоянию метода ионно-пучковой обработки оптических поверхностей, анализируются основные факторы, влияющие на качество обработки, а также описываются методы прецизионной аттестации формы и шероховатости поверхностей в контексте их применения для решения задач оптики рентгеновского диапазона длин волн.

Значительная часть второй главы посвящена экспериментальному исследованию физических процессов ионного распыления монокристаллических материалов (сапфира и кремния) ионами инертных газов (Ar, Ne, Xe), в том числе рассматривается влияние параметров процесса на скорость удаления материала и шероховатость поверхности. Анализ экспериментальных данных позволил выявить ключевые параметры, определяющие качество подложек рентгенооптических элементов. Для достижения требуемой спецификации оптических элементов произведена модернизация источников ионов для новой установки ионно-пучковой обработки, позволившая реализовать разработанные методики ИПТ.

Третья глава посвящена разработке методов улучшения качества обработки оптических поверхностей при использовании широкоапертурных сильноточных ионных пучков и формирующих диафрагм. Исследованы возможности профилирования поверхности с помощью формирующей диафрагмы ионного пучка и кинематики движения обрабатываемой заготовки. Предложен и опробован на практике целый ряд оригинальных методик, позволивших существенно повысить точность и скорость обработки оптических элементов. Разработанные методики адаптированы для рентгеновских зеркал как нормального, так и скользящего падения: в частности, удалось изготовить подложку тороидального зеркала с отклонением от кругового цилиндра более 30 мкм.

В четвертой главе представлены новые подходы, разработанные для реализации методики коррекции локальных ошибок формы малоразмерным (сфокусированным) ионным пучком. Предложен оригинальный алгоритм расчета времени локальной экспозиции, основанный на матричном представлении задачи и оптимизации параметров

процесса методом градиентного спуска. Использование матричного представления вместо обычного функционального позволило избавиться от ряда детерминированных ошибок, связанных с наличием резкого скачка производной на границе детали и прямой зависимости локального времени травления от высоты ошибки формы поверхности. Необходимо отметить также создание специального вспомогательного прибора – контурографа, позволившего точно определить физические границы обрабатываемой детали, что позволило устранить ошибки, связанные с неточной юстировкой центра ионного пучка. Описанные улучшения позволили в результате достигнуть субнанометровой точности изготавливаемой поверхности, до 0,6 нм (СКО).

В заключении описаны основные результаты работы, отмечены возможности и перспективы разработанных методов и оборудования. В том числе, отмечена достигнутая высокая эффективность ионно-пучковой асферизации и полировки широкоапертурным сильноточным ионным пучком, а также прецизионной коррекции формы.

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

- на основе проведенных расчётов, численного моделирования и экспериментальных исследований процессов ионного травления была создана и протестирована уникальная установка ионно-пучкового травления, оснащённая тремя источниками ускоренных ионов и пятиосной системой позиционирования детали, позволяющая проводить ионные асферизацию и полировку, а также коррекцию локальных ошибок формы поверхности оптических элементов размером до Ø320 мм с произвольной формой и геометрией, обеспечивая точность формы до 0,6 нм (СКО) и шероховатость до 0,15 нм (в диапазоне пространственных частот $4,9 \cdot 10^{-2} - 6,3 \cdot 10^1$ мкм⁻¹);

- предложен технологический метод изготовления корректоров волнового фронта для компенсации оптических аберраций с использованием широкоапертурного сильноточного источника. Метод основывается на разложении аберраций по базису полиномов Цернике и реализуется за счёт комбинации стандартной осесимметричной обработки и ионной обработки, создающей азимутальную зависимость профиля за счет переменной скорости вращения заготовки;

- разработана новая методика обработки оптических элементов, устраняющая негативные эффекты ошибки центровки вблизи центра оптической детали. Предложено использование дополнительного сдвига оси вращения обрабатываемого оптического элемента для предотвращения появления связанных с ошибкой центровки дефектов обработки.

Результаты работы являются **достоверными**, что обусловлено корректностью выбранной методологии, её экспериментальной проверкой и репрезентативностью полученных данных. Примененные в исследовании методы и подходы являются научно обоснованными и адекватными целям работы. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием современного оборудования, что также гарантирует высокую точность и надежность результатов. Полученные в работе результаты не противоречат известным научным фактам и результатам других авторов. Материалы диссертации прошли многократную апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

По работе А.К. Чернышева можно сделать следующие замечания:

- 1) В работе не обсуждается вопрос об использовании разработанных автором методик и установок для изготовления прецизионной оптики ближнего УФ и видимого спектральных диапазонов, в том числе выпуклых асферических оптических поверхностей линз. Как известно, сверхгладкие зеркала уже нашли своё применение в лазерных гироскопах, а асферическая оптика может быть полезной при создании УФ-микроскопов высокого разрешения.
- 2) При описании стола для образцов в разделе 2.1.1 нет информации о механической конструкции держателя образцов. Т.к. установка рассчитана на обработку достаточно больших и тяжелых (до 25 кг) оптических деталей, возникает вопрос о возможных механических напряжениях и искажениях формы при фиксации и зажимах, которые проявляются на нанометровых масштабах.
- 3) Также возникает вопрос о возможном нагреве образца при его обработке ионным пучком, что может приводить к его тепловому расширению.
- 4) Представляется неудачным использование автором аббревиатуры IBF в оглавлении диссертации. Кроме того, обычно принято использовать такие сокращения всегда вместе с вспомогательным словом, например, «метод IBF», «функция PSD» для лучшего восприятия текста, что не было сделано автором.
- 5) Необходимо отметить некоторую небрежность и опечатки (например, см. опечатку на Рис. 4.4) при оформлении работы: попеременное использование в тексте обозначений RMS и СКО, отсутствие в некоторых таблицах названия или обозначения параметров вместе с именем переменной.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа Чернышева А. К. является законченным научным исследованием и содержит новые результаты, имеющие **научную значимость и практическую**

ценность. По материалам диссертации опубликованы 19 научных работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Web of Science и Scopus, а также получено 3 патента Российской Федерации.

Автореферат достоверно и полно отражает содержание диссертации.

Тема диссертационной работы Чернышева А. К. «Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики», её цель, постановка задач и методы их решения соответствуют паспорту специальности 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с изменениями на 11 сентября 2021 года), а ее автор, Чернышев Алексей Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук до специальности 1.3.2 - приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на семинаре отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова ФИАН 28.11.2025 г.

Отзыв подготовил

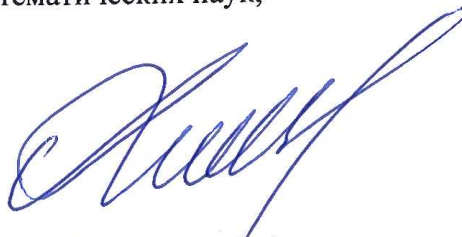
И.о. зав. лабораторией рентгеновской оптики
отделения квантовой радиофизики ФИАН,
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук,
iart@lebedev.ru, тел. (499) 132-65-22



Артюков Игорь Анатольевич

« 02 » декабря 2025 г.

Руководитель семинара,
руководитель отделения КРФ ФИАН,
доктор физико-математических наук,
профессор



Ионин Андрей Алексеевич

« 02 » декабря 2025 г.

Подпись Артюкова И.А. и Ионина А.А. заверяю
Учёный секретарь ФИАН,
кандидат физико-математических наук



Колобов Андрей Владимирович

« 02 » декабря 2025г.

Адрес ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

119991 ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53

Тел. 8 (499) 135-14-29

<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lebedev.ru