

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29.01.2026 № 1

О присуждении Чернышеву Алексею Константиновичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики – принята к защите 06 ноября 2025 г. (протокол заседания № 9) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФРАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Чернышев Алексей Константинович, 1997 года рождения, в 2021 году окончил обучение в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" г. Н. Новгород, Россия, по специальности 03.04.02 «Физика», направленность (профиль) образовательной программы «Физика конденсированного состояния», освоил программу подготовки научных и

научно-педагогических кадров в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (срок обучения 01.09.2021 – 31.08.2025), работает в должности младшего научного сотрудника Института физики микроструктур (ИФМ РАН) – филиала ИПФ РАН.

Диссертация выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН.

Научный руководитель – Пестов Алексей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией 133 отдела многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Коробейщиков Николай Геннадьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела прикладной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

2. Дружин Владислав Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном и.о. заведующего лабораторией рентгеновской оптики отделения квантовой радиофизики (КРФ) ФИАН, ведущим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук, Артюковым Игорем Анатольевичем, руководителем семинара, руководителем отделения КРФ ФИАН, д.ф.-м.н., профессором, Иониным Андреем Алексеевичем, и утвержденном заместителем директора по научной работе, д.ф.-м.н, Савиновым Сергеем Юрьевичем, указала, что к наиболее значимым **новым результатам** диссертационной работы А.К. Чернышева следует отнести:

1. На основе проведённых 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 320 мм с произвольной формой и геометрией, обеспечивая точность формы до 0,6 мкм (СКО) и шероховатость до 0,15 нм (в диапазоне пространственных частот $(4,9 \cdot 10^{-2} - 6,3 \cdot 10^1 \text{ мкм}^{-1})$);

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

3. 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.

В конце отзыва делается заключение, что тема диссертационной работы Чернышева А. К. «Развитие ионно-пучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики», её цель, постановка задач и методы их решения соответствует паспорту специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), а её автор, Алексей Константинович Чернышев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. - приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель по теме диссертации имеет 19 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, 5 из которых приведены ниже:

1. 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
2. Chernyshev, A.K. Axisymmetric surface shape correction of optical elements by a wideaperture ion beam / A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov et al. // Applied Optics. – Vol. 61. – Issue 33. – pp. 9879-9887 (2022)
3. 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..
4. Чернышев А.К. Прибор для определения контура видимой части оптических элементов (контурграф) / Артюхов А.И., Глушков Е.И., Михайленко М.С. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2025. - №4. - С. 28-36.
5. 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.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва (**все положительные**):
1) Горай Леонид Иванович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01: – «Приборы и методы экспериментальной физики», главный научный сотрудник лаборатории наноэлектроники Академического университета имени Ж.И. Алферова в отзыве на автореферат диссертации отмечает, что практическая значимость работы обосновывается востребованностью результатов работы для современных источников жесткого рентгеновского излучения. Защищаемые положения подтверждают актуальность и новизну решаемой проблемы. Содержание автореферата соответствует требованиям, предъявляемым Высшей аттестацион-

ной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Чернышев А.К. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

2) Пунегов Василий Ильич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», профессор, главный научный сотрудник Физико-математического института ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», отмечает что диссертационная работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, а ее автор Чернышев Алексей Константинович, несомненно, заслуживает учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

3) Кузин Сергей Вадимович, доктор физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика, радиоастрономия», заведующий лабораторией Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ РАН), отмечает, что диссертационная работа Алексея Константиновича Чернышева «Развитие ионнопучковых методов формирования высокоточных поверхностей для рентгеновской оптики» соответствует паспорту специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики» и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (с изменениями на 25.01.2024), а ее автор, Алексей Константинович Чернышев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных рентгеновской оптике, ионному распылению и оптическим системам (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Коробейщиков Н. Г. – более 5 публикаций, оппонент Дружин В. В. – более 5 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, в результате выполненных соискателем исследований:

1. **Сформулирована и решена** задача коррекции локальных ошибок формы оптической поверхности малоразмерным ионным пучком в дискретном представлении.

2. На основе дискретного представления задачи коррекции локальных ошибок формы поверхности оптического элемента **разработан** алгоритм расчёта карты травления, позволяющий формировать поверхности с ошибками формы менее 1 нм по параметру среднеквадратического отклонения поверхности (СКО).

3. **Предложены** методы формирования поверхности рентгенооптических элементов скользящего падения широкоапертурным сильноточным ионным источником через формирующую профиль ионного пучка диафрагму при линейном перемещении образца с рассчитанной зависимостью скорости движения от координаты.

4. Впервые **предложен и разработан** алгоритм расчета формы диафрагм, профилирующих ионный пучок, и законов движения экспериментальных образцов, обеспечивающих получение с помощью широкоапертурного сильноточного ионного источника рельефа на поверхности оптических элементов произвольной формы, компенсирующего аберрации, описываемые полиномами Цернике (сферическая аберрация, кома, астигматизм и т.д.).

5. При удалении материала с поверхности образца широкоапертурным ионным источником, через профилирующую диафрагму при равномерном вращении образца **показано**, что смещение оси вращения относительно максимума плотности ионного тока в пучке позволяет достичь равномерного ионного травления вблизи оси вращения при использовании диафрагмы с открытым центром.

6. Проведена модернизация ионных источников КЛАН-12М и КЛАН-53М, позволившая достичь высоких значений плотности ионного тока без использования обрезающих ионный пучок диафрагм, за счет применения фокусирующей ионно-оптической системы. Установлены зависимость размеров

(2,1-25 мм) и формы кратеров ионного травления от параметров пучка (ионный ток, энергия ионов) и расстояния до обрабатываемого образца.

7. **Предложен и разработан** контурограф для точного (до 2.5 мкм) позиционирования оптических деталей в установке ионно-пучковой обработки, что позволяет повысить точность коррекции формы поверхности.

8. **Разработана** установка ионно-пучковой обработки, предназначенная для создания высокоточных оптических деталей диаметром до 320 мм и массой до 25 кг. Благодаря регулируемым диаметру пучка (2,1-160 мм), току (0,3-200 мА) и энергии (200-1500 эВ) ионов, а также разработанным методикам ионно-пучковой обработки обеспечивается точность формы поверхности оптических элементов 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.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

Практическая значимость работы заключается в создании комплексного технологического решения для производства высокоточной рентгеновской и ЭУФ-оптики, позволяющего преодолеть ключевые ограничения современных методов обработки. 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. Созданная установка ионно-пучковой обработки с уникальной комбинацией функциональных возможностей обеспечивает полный цикл финишной обработки поверхности (ионная полировка, асферизация и финишная коррекция локальных ошибок формы) подложек для многослойных рентгеновских зеркал, удовлетворяя мировому уровню качества оптических поверхностей. 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 методы ионно-пучковой обработки нашли практическое применение при создании 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).

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием современного технологического и измерительного оборудования, а также адекватным выбором использованных подходов. Научные положения диссертации не противоречат экспериментальным результатам и теоретическим моделям других научных групп. Полученные результаты опубликованы в реферируемых журналах и доложены на ряде международных конференций.

Личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию:

Все выносимые на защиту результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Чернышев А.К. принимал участие в постановке и решении задач диссертационной работы, постановке экспериментов, обсуждении и интерпретации результатов. Вклад Чернышева А. К. является определяющим при разработке подхода и реализации алгоритма решения задачи коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком в дискретном представлении, а также методики расчета сечения профилирующих ионный пучок диафрагм и законов движения экспериментальных образцов, обеспечивающих формирование с помощью широкоапертурных сильноточных источников ионов рельефа, компенсирующего аберрации, описываемые полиномами Цернике (сферическая аберрация, кома, астигматизм и т.д.). Вклад соискателя в разработку алгоритмов осесимметричной коррекции формы и асферизации, а также формирования элементов оптики скользящего падения с помощью широкоапертурных сильноточных источников ионов является равнозначным с А.Е. Пестовым, также, как и вклад в разработку

оборудования, в частности в модификацию источников ускоренных ионов и концептуализацию схемы установки ионно-пучкового травления. Вклад А.К. Чернышева в разработку контурографа является равнозначным с А.И. Артюховым и Р. А. Шапошниковым. Интерпретация экспериментальных данных проводилась совместно с соавторами журнальных публикаций.

В ходе защиты диссертации официальный оппонент Н. Г. Коробейщиков высказал следующее замечание:

При наклонных углах падения ионов на поверхность сапфира (около 60° и выше) отмечен значительный рост шероховатости поверхности (см. рисунок 2.16), что автор справедливо, со ссылкой на литературу, объяснил формированием самоорганизованных наноструктур (nanoripples). Неожиданно, что при распылении кремния при аналогичных углах такие процессы авторами не обнаружены (см. рисунки 2.10 (б), 2.12 (б)). Известно, что на поверхности кремния при бомбардировке ионами аргона под наклонными углами также регистрируют формирование упорядоченных наноструктур (см., например, R. Cuerno, J.-S. Kim, J. Appl. Phys. 128 (2020) 1809020, и др.). Желательно прояснить данное противоречие

Соискатель Чернышев А. К.:

Действительно, в ходе изучения поведения поверхности монокристаллического кремния при облучении ускоренными ионами было обнаружено формирование различных структур, в том числе и ripples. Однако, формирование этих структур наблюдается при облучении ионами с энергией ниже пороговой, а при энергии выше, наблюдается сглаживание вплоть до 80° от нормали. И такое поведение наблюдается не только с ионами аргона, но и с ионами других инертных газов. Одна из целей диссертационной работы состояла в нахождении режимов ионного травления, при которых происходит сглаживание поверхности. Поэтому формирование структур не было подробно рассмотрено.

Официальный оппонент В. В. Дружин высказал следующее замечание:

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.).

Соискатель Чернышев А.К.:

В исследовательской группе ранее проводились исследования распыления астроситалла, привёл результаты данных исследований и уточнил, что лично не занимался исследованием распыления данных материалов, и поэтому в диссертации нет этих материалов.

На заседании 29.01.2026 г. диссертационный совет, за разработку математических алгоритмов описания процесса ионного травления, разработку и модернизацию экспериментального оборудования и развитие практических методов формирования высокоточных оптических асферических поверхностей ионно-пучковыми методами, принял решение присудить Чернышеву Алексею Константиновичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики), участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0 (нет).

Председатель диссертационного совета

Красильник З. Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д. Ю.

Дата оформления Заключения 29.01.2026 г.

