

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

Актуальность выбранной темы

Известно, что современные тенденции прогресса различных технологических приложений и исследовательских проектов стимулируют развитие новых источников ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Короткие длины волн излучения требуют сверхвысокого качества поверхности используемых оптических элементов. Субнанометровые значения основных величин необходимы не только для шероховатости рабочих поверхностей, но и для погрешностей формы оптических элементов. Ионно-пучковая обработка является известной технологией финишной обработки поверхности материалов. Однако, указанные требования являются фактически предельными для известных технических решений. Диссертационная работа А.К. Чернышева посвящена развитию методик обработки поверхности материалов ионными пучками благородных газов для получения элементов рентгеновской оптики дифракционного качества. Таким образом, высокая актуальность выбранной диссертантом темы и сформулированных задач исследования несомненна.

Новизна полученных результатов

По результатам выполнения работы диссертантом представлены следующие новые результаты:

- Разработана методика комплексной финишной обработки оптических деталей с использованием взаимодополняющих источников низкоэнергетичных ионов аргона: широкоапертурного квазипараллельного, фокусирующего асферизационного через профилирующую диафрагму, фокусирующего малоразмерного коррекционного;
- Разработанная методика успешно апробирована на ионно-пучковой установке на примерах решения реальных задач – формирование поверхности рентгенооптических элементов сложной геометрии из плавленого кварца и кремния;
- Предложены и реализованы оригинальные методики ионно-пучковой обработки, включающие в себя обработку со смещением центра вращения детали наклон распределения ионного тока в пучке, обработку с использованием профилированных диафрагм и периодического закона движения обрабатываемой детали, метод контроля положения заготовки с помощью оптического контурографа.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 120 источников.

Во **введении** кратко описана актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, используемая методология. Обоснованы новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, подчеркнут личный вклад диссертанта, приведен перечень конференций, на которых представлялись результаты работы.

В **Главе 1** на основе обзора литературы приведено описание современных методов прецизионной обработки оптических элементов рентгеновской оптики с кратким анализом их преимуществ и недостатков. Основной упор автор обоснованно сделал на описание достижений и нерешенных проблем обработки ионными пучками благородных газов: коррекция локальных ошибок формы элемента, проблем позиционирования, и др. В качестве заключения сформулированы основные требования к разрабатываемой методике ионной обработки.

Глава 2 посвящена подробному описанию экспериментальной установки, конструкции и основных характеристик оригинальных ионных источников, использованных автором в данной работе. Необходимо отметить такие особенности модернизированных источников как высокие максимальные токи и возможности регулировки энергии ионов в диапазоне от 300 до 1500 эВ. Отдельный раздел посвящен исследованию распыления кремния и сапфира ионами разных газов (аргона, неона, ксенона) при различных условиях: энергиях и углах падения ионов на мишень, кристаллографических ориентациях подложек. К сожалению, автор не приводит подробного анализа представленных здесь результатов.

В **Главе 3** описаны результаты, полученные при обработке рентгенооптических элементов широкоапертурным пучком ионов аргона. Предложены подходы по оптимизации геометрии диафрагм и изменения траектории движения детали для обработки поверхностей сложной формы, обеспечивающие травление на значительные глубины при ангстремном уровне шероховатости поверхности. Отдельное внимание автор уделяет проблемам обработки вблизи оси вращения детали, а также компенсации волновых аберраций. Важно, что возможности разработанных методик иллюстрируются на примерах формирования сложных тороидальных и цилиндрических поверхностей на рентгенооптических элементах скользящего падения.

В **Главе 4** представлены результаты по прецизионной обработке оптических деталей малоразмерными фокусирующими ионными источниками для устранения локальных ошибок формы поверхности. Показано, что предложенные расчетные подходы и алгоритмы (в частности, матричное представление задачи о коррекции локальных ошибок формы) позволяют существенно сократить трудозатраты и за конечное время достичь заданного уровня точности формы и качества обрабатываемых деталей. Разработанный прибор – контурограф обеспечивает точное позиционирование обрабатываемой поверхности объектов произвольной формы и ориентации относительно ионного пучка, что является важной задачей при производстве рентгенооптических элементов.

Несомненными **достоинствами работы** являются высокая практическая ценность представленных результатов. Корректность и работоспособность всех описанных аналитических алгоритмов и предложенных технических решений доказаны путем

обработки полноразмерных оптических элементов с получением качества формы и уровня шероховатости поверхности, необходимых для решения реальных исследовательских и прикладных задач.

Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации.

Замечания и недостатки

1. Для зависимостей шероховатости поверхности кремния от энергии ионов (рисунки 2.1 (б) – 2.3 (б)) приведены значительно различающиеся и немонотонные зависимости для различных кристаллографических ориентаций мишени. К сожалению, диссертант не дает подробного описания приведенных особенностей и физического объяснения полученных результатов, что желательно.

2. Для коэффициентов распыления кремния (рисунки 2.1 (а) – 2.3 (а)) отсутствуют сравнения приведенных диссертантом величин с известными данными других авторов и/или расчетными значениями. Очевидно, что такие сравнения повысили бы достоверность представленных результатов.

3. 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.

4. В качестве редакционных замечаний следует указать следующие неточности:

– В разделе 2.1.1 автор отмечает, что «Эксперименты проводились в широком диапазоне энергий ионов от 200 до 1500 эВ...», что соответствует заявленным характеристикам разработанных ионных источников. Однако все последующие результаты приведены только для энергии ионов менее 1000 эВ.


– На стр. 24 автор пишет: «При энергии падающих ионов в диапазоне от 1.5 кэВ до 10 кэВ пространственная скорость перемещения плотности вещества достаточно велика внутри мишени, и такой режим принято называть «spike»». Некорректное высказывание. Как известно, режим spike sputtering в первую очередь характеризуется высоким локальным приповерхностным энерговыделением, локальным плавлением поверхности мишени. Такой режим возникает при столкновении с твердой поверхностью тяжелых или многократно заряженных ионов, а также газовых кластеров.

– Часто в описании экспериментов и подписях к рисункам отсутствует полное описание использованных условий, что затрудняет анализ результатов. В частности, не указаны ионные флюенсы или дозы облучения для результатов по распылению кремния и сапфира.

Указанные замечания и недостатки не снижают общего благоприятного впечатления от рассматриваемой диссертационной работы и ее положительную оценку в целом. Результаты работы апробированы путем обсуждения на известных научных конференциях и публикациями в виде статей в высокорейтинговых журналах. Практическая ценность дополнительно подтверждается тремя патентами на изобретения в соавторстве с коллегами.

Рассматриваемая диссертационная работа соответствует критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013г с изменениями на 11.09.2021г, а её автор, Чернышев Алексей Константинович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент
Коробейщиков Николай Геннадьевич
доктор физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы,
ведущий научный сотрудник Отдела прикладной физики ФФ ФГАОУ ВО
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)
телефон: +7 (383) 306-6612
E-mail: korobei@nsu.ru


12.01.2026г.

Подпись Коробейщикова Николая Геннадьевича заверяю.

Ученый секретарь НГУ





Тарабан Е.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

www.nsu.ru

Почтовый адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Телефон: +7 (383) 363-40-04