

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Михайленко Михаила Сергеевича «Разработка аппаратуры и методов ионно-пучкового травления для получения высокоточных элементов рентгеновской оптики», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа М.С. Михайленко посвящена актуальной проблеме созданию высокоточных элементов оптики коротковолнового диапазона длин волн. В работе проведено глубокое экспериментальное исследование взаимодействия ускоренных ионов низких энергий с аморфными, поликристаллическими и монокристаллическими мишенями, из материалов, применяемых в прикладной оптике. Работа имеет практическую значимость. М.С. Михайленко произведена модернизация технологического оборудования, на базе которого разработаны и развиты методики ионно-пучковой обработки оптических элементов, которые позволили реализовать ряд уникальных рентгенооптических схем. Украшением работы является реализация алгоритма расчета взаимодействия ионов с одноатомной аморфной мишенью, моделирующего не только количество распыленных атомов, но и динамику шероховатости поверхности.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, из которых первая представляет литературный обзор по рассматриваемой тематике, а в четырех последующих главах представлены полученные результаты. Текст диссертации завершается заключением и списком цитируемой литературы, включающего в себя перечень публикаций, подтверждающих участие автора диссертации в исследованиях, результаты которых защищаются в представленной работе. Общий объем диссертации, составляет 180 страниц, включая 100 рисунков, 6 таблиц и список литературы.

Введение включает в себя краткий обзор исследований по тематике диссертации, важность и значимость исследований процессов ионного распыления. Значительное внимание уделяется обоснованию актуальности темы диссертации требованиями к качеству формы и шероховатости поверхности рентгенооптических элементов, ставятся задачи исследования, формулируются цель работы, ее практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и личное участие автора диссертации.

Первая глава является обзорной, включающей большой список литературы по тематике диссертации. В главе вводятся основные понятия процесса ионного распыления, описан механизм взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью, особенности, связанные с энергией ионов и структурой мишени, уделено внимание технике создания направленных пучков ускоренных ионов. В завершающей части подробно описаны требования к подложкам для оптических элементов рентгеновского диапазона длин волн, вводится понятие ошибок формы и шероховатости поверхности, указана специфика влияния ошибок формы и шероховатости на качество изображения и коэффициенты отражения многослойных рентгеновских зеркал.

В главе 2 описаны применяемые автором инструментальные методики исследования экспериментальных образцов для оценки глубины травления и эффективной шероховатости. Проведенное глубокое экспериментальное исследование процессов взаимодействия ускоренных ионов с различными типами мишеней (аморфной, поликристаллической и монокристаллической). В частности, автор выявил зависимости коэффициентов распыления и шероховатости поверхности от энергии ионов и угла падения ионов на поверхность образца. Это позволило, что показано в последующих главах, применить полученные им выводы для разработки методик ионной обработки оптических элементов. Важным результатом стало обнаружение порогового характера зависимости шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии ионов. Украшением главы является исследование приповерхностного нарушенного слоя, формирующегося в процессе ионной обработки поверхности, исследование которого позволило объяснить изменение в поведении зависимости шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии ионов, формированием квазиаморфной фазы кремния.

В главе 3 описаны развитые в работе методики обработки поверхности рентгенооптических элементов, обеспечивающие минимальную шероховатость и высокую точность формы. Описано два основных метода – локальная обработка поверхности малоразмерным ионным пучком и глобальная со значительным по глубине удалением материала широким ионным пучком. Для второй задачи предложен алгоритм, реализованный в виде оконного приложения для расчета обрезающих ионный пучок диафрагм. Важным видится предложенная в главе 3 методика создания гладких поверхностей за счет применения технологического покрытия из аморфного кремния, ионное травление которого позволяет получить шероховатость на уровне единиц ангстрем на подложках, где не удастся получить такие значения шероховатости с помощью традиционных методов обработки (механическая и/или ионная полировка).

В главе 4 описан ряд реализованных на практике новшеств и технологических решений, позволивших апробировать предложенные в главе 3 методики. В частности, создано две экспериментальные установки, которые позволяют проводить как коррекцию локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком, так и глубокую асферизацию и ионную полировку широким квазипараллельным пучком через обрезающую ионный пучок диафрагму. Предложенное и реализованное автором решение заменить плоскую ионно-оптическую систему на вогнутую фокусирующую существенно улучшило характеристики ионного пучка, что позволило повысить точность и производительность процесса коррекции локальных ошибок формы.

В главе 5 представлена расчетная модель описания процесса физического распыления с учетом эволюции поверхности, основанная на теоретических предпосылках и реализованная на основе метода Монте-Карло. Уточнение потенциала взаимодействия за счет априорных экспериментальных данных позволило получить более качественное описание коэффициента распыления, чем при использовании широко применяемого программного пакета SRIM. Важной особенностью модели является трехмерная сетка, расчет на которой позволил моделировать эволюцию поверхности и предсказывать поведение шероховатости поверхности. Для иллюстрации работоспособности модели приводится сравнение расчета и эксперимента для аморфного кремния.

Научное значение результатов, обсуждаемых в диссертации, подтверждено высоким статусом публикаций, в которых они представлены.

Практическое значение работы заключается в первую очередь в том, что реализованные в рамках работы оптические элементы активно применяются для

рентгеновском микроскопии, ЭУФ литографии, диагностики короны Солнца, диагностики плазмы и синхротронных применений.

Опыт, накопленный в результате аппаратного конструирования и проведенных исследований, может быть полезен для Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Института кристаллографии РАН, Физико-технического института РАН им. А.Ф. Иоффе, Института общей физики РАН и др.

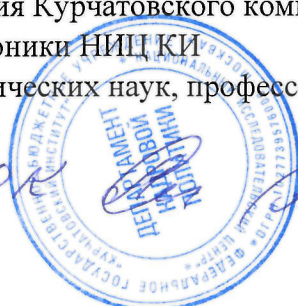
Работа М.С. Михайленко видится целостным и глубоким исследованием в области взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью, результаты изложены ясно. Текст диссертации показывает, что ее автор обладает достаточно глубокими теоретическими знаниями в сочетании с их серьезным экспериментальным применением. Тем не менее следует сделать следующие замечания.

1. Используемая автором для оценки толщины приповерхностного переходного слоя формула 2.13 является приближенной. Более точное решение даже учетом шероховатости поверхности предложено в работе Кожевникова с соавторами: I.V. Kozhevnikov, L. Peverini, and E. Ziegler / Development of a self-consistent free-form approach for studying the three-dimensional morphology of a thin film / Physical Review B — 2012. — V. 85. — P. 125439. Этот подход основан на решении обратной задачи рентгеновской рефлектометрии.
2. В главе 1 автор указывает, что «Zerodur не поддается ионной обработке и его шероховатость под ионным пучком развивается». Однако далее в главе 2 автор пишет, что этот материал среди других находит широкое применение «в качестве подложек для оптических элементов рентгеновской оптики».
3. Приходится отметить, что в тексте содержится большое количество опечаток и грамматических ошибок.

Отмеченные недостатки не снижают ценности полученных результатов и их достаточности для защиты диссертационной работы. Основные материалы работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для кандидатских диссертаций.

Результаты работы докладывались на международных конференциях и известны специалистам. Эти результаты полностью отражены в публикациях. Их новизна и важность не вызывают сомнения. Автореферат достаточно полно отражает основные подходы и важнейшие результаты диссертационной работы. Диссертационная работа Михайленко Михаила Сергеевича «Разработка аппаратуры и методов ионно-пучкового травления для получения высокоточных элементов 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 11 сентября 2021 года), а ее автор, Михаил Сергеевич Михайленко, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук до специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Заведующий лабораторией рентгеновской рефлектометрии
и малоуглового рассеяния Курчатовского комплекса
кристаллографии и фотоники НИЦ КИ
доктор физико-математических наук, профессор



В.Е. Асадчиков

В.Е. Асадчиков

2.12.2024

Нагальник