

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию Михайленко Михаила Сергеевича
«РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ И МЕТОДОВ ИОННО ПУЧКОВОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики**

Диссертационная работа М.С. Михайленко рассматривает вопросы экспериментальной проработки основ, создание методик и соответствующей аппаратуры для создания подложек элементов рентгеновской оптики с субнанометровой точностью формы и шероховатостью поверхности. В диапазоне длин волн от единиц до 200 нм можно применять только отражающие оптические элементы, причем их количество необходимо минимизировать, поскольку даже при использовании многослойных отражающих покрытий коэффициент отражения оказывается далек от 100%. Расширение поля зрения удастся достигать с использованием асферических отражателей весьма непростой формы (четвертого, шестого и более высоких порядков). Точность формы должна быть не хуже единиц нанометров. Помимо этого, на отражение существенное влияние оказывает гладкость поверхности. При наличии шероховатости более 0.3 нм значительно повышается рассеяние и драматически падает качество получаемого изображения. В качестве метода суперпрецизионной обработки поверхности деталей выбрано облучение пучками ускоренных ионов инертных газов. Одним из основных явлений, наблюдаемых при облучении твёрдого тела ускоренными ионами, является распыление, то есть эмиссия атомов мишени под действием бомбардировки. Таким образом можно удалять с поверхности подложки слои материала толщиной от долей нанометров до нескольких микрометров. Как известно, характер и ход процессов взаимодействия ионов с мишенью существенно зависит от большого числа параметров. До сих пор, несмотря на довольно длинную историю исследований этого вопроса, остается весьма много белых пятен и нерешенных задач, всеобъемлющие теоретические модели отсутствуют. Для совершенствования прикладных методов обработки необходимо выполнять экспериментальные исследования характеристик распыления конкретных подложек конкретными ионами. Изучение ионного распыления материалов, перспективных в качестве подложек оптических элементов рентгеновской оптики, создание методик коррекции формы и полировки пучками ускоренных ионов, а также разработка соответствующего оборудования и является целями рассматриваемой диссертационной работы. Таким образом, тема представленного исследования *является актуальной и практически значимой.*

В работе получены систематические экспериментальные зависимости коэффициентов распыления и формирования поверхностных структур мишеней из кремния, кварца и бериллия пучками ионов неона, аргона и ксенона в диапазоне энергий от 100 до 1500 эВ и углов от 0 до 80 градусов от нормали. Обнаружены ранее неизвестные особенности на этих распределениях. Впервые изучено влияния ионного травления на пространственно-частотные свойства поверхностного рельефа в зависимости от параметров облучения. Предложен и реализован алгоритм численного моделирования развития формы поверхности при ее облучении, основанный на приближении парных столкновений и методе Монте-Карло. Показано, что рост

интенсивности диффузного рассеяния связан с образованием приповерхностного нарушенного слоя, формирующегося в процессе ионной бомбардировки, а не с развитием шероховатости. Выполнено исследование структуры этого приповерхностного нарушенного слоя. Предложены методики ионно-пучковой коррекции формы и прецизионной полировки поверхности. Разработаны и созданы установки для проведения обработки оптических деталей. Все описанные результаты *получены автором впервые*.

При разработке методики проведения экспериментов и моделирования автор внимательно рассматривает имеющиеся проблемы, отдельно фокусируясь на критических параметрах, влияющих на результат. Применяемое сочетание экспериментальных исследований процессов распыления с моделированием дает возможность глубже проникнуть в суть и выявить неизвестные ранее особенности и механизмы. Сравнение получаемых результатов с литературными данными показывает неплохое согласие в части, где это возможно, что подтверждает *корректность и надежность* сделанных в диссертации выводов.

По прочтении работы считаю, что полученные автором результаты *являются новыми*, расширяют представление о процессах, происходящих при высокодозном облучении поверхности оптических элементов ионами инертных газов. Разработанные методики и созданные установки хорошо зарекомендовали себя в практическом использовании при формировании отражающих поверхностей рентгеновской оптики. Не вызывает сомнений, что М.С.Михайленко *лично внес основной вклад* в постановку задач и разработку методики исследований, выполнил большой объем экспериментальных исследований, проанализировал полученные данные, предложил и реализовал алгоритмы моделирования формирования шероховатости и создания формы маски для получения требуемой геометрии поверхности деталей, создавал экспериментальные установки. Накопленный материал существенно улучшает понимание модификации поверхности при облучении ускоренными ионами, что делает работу *значимой теоретически*. Результаты исследования *являются* также и *практически значимыми*, поскольку позволили создать установки и оптимизировать режимы облучения для тонкой модификации поверхности элементов рентгеновской оптики. *Основные результаты*, описанные в диссертации, *достаточно полно отражены* в 25 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и были представлены на большом количестве международных и всероссийских конференций. По материалам работы было получено 2 патента на изобретение. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

В то же время, при прочтении работы у меня возник ряд вопросов и замечаний.

1. Обнаруженное явление скачкообразного изменения коэффициента распыления, проявляющееся при травлении монокристаллического кремния, чрезвычайно интересно. В работе оно объясняется появлением квазиаморфной фазы в приповерхностном слое толщиной ~ 12 нм. Можно ли сказать, что при облучении с энергиями ниже пороговой сходная квазиаморфная фаза, пусть другой толщины, не образуется? Если да, то каков механизм ее формирования

2. Учитывались-ли необходимость выхода на стационарный режим травления при проведении анализа состава поверхности методом ВИМС? Как это влияет на получаемые распределения внедренных примесей по глубине?

3. На с. 84 автор утверждает, что в процессе ионного травления «...происходит накопление атомов газа под поверхностью и когда наступает стационарный процесс, это распределение уже не меняется». Однако, из рис. 2.41 следует, что концентрация внедренных атомов быстро нарастает (до глубины травления 0.5 мкм), а потом непрерывно снижается вплоть до самых высоких доз, соответствующих глубине травления 11 мкм. Что приводит к наблюдаемому снижению концентрации?

4. Автор приводит только обзорные спектры рентгеновских фотоэлектронов монокристаллического кремния, для других подложек таких данных в работе нет. Стоило бы также показать подробные спектры линий кремния и кислорода, по которым можно получить существенную информацию о строении приповерхностного нарушенного слоя.

В то же время, указанные замечания не снижают общего высокого мнения о представленной работе. В соответствии со сказанным выше считаю, что **диссертация** «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.

Официальный оппонент



Карасев Платон Александрович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор высшей инженерно-физической школы
института электроники и телекоммуникаций
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Тел. (812) 552-75-16;
e-mail: platon.karaseov@spbstu.ru

Подпись	<i>Карасев П.А.</i>
УДОСТОВЕРЯЮ	
Ведущий специалист	<i>Сидорин</i>
по кадрам	<i>Вешникова</i>
«28» 11 2024	

