

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 19.12.2024 № 18

О Присуждении Михайленко Михаилу Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка аппаратуры и методов ионно-пучкового травления для получения высокоточных элементов рентгеновской оптики» по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики — принята к защите 03 октября 2024 г. (протокол заседания №10) 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» 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 Михайленко Михаил Сергеевич, 1994 года рождения, в 2019 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «11.04.04 – Электроника и наноэлектроника», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИФМ РАН

(срок обучения 01.09.2019 – 31.08.2023), работает в должности младшего научного сотрудника Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Диссертация выполнена в отделе многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель – Пестов Алексей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией коротковолновой прецизионной оптики и перспективного приборостроения Отдела многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. Асадчиков Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор по специальности «Физика конденсированного состояния» МГУ, начальник лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института Кристаллографии РАН (Москва, ФНИЦ Кристаллография и Фотоника).
2. Карасёв Платон Александрович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук. – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего отделом физики полупроводников и наноструктур ОФТТ ФИАН доктором физ.-мат. наук Пудониным Федором Алексеевичем, ведущим научным сотрудником,

исполняющим обязанности руководителя ОФТТ ФИАН доктором физико-математических наук Кривобоком Владимиром Святославовичем, и утвержденном доктором физико-математических наук, профессором Рябовым Владимиром Алексеевичем, заместителем директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, указала, что «К наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие:

1. Проведено систематическое изучение поведения коэффициентов распыления и шероховатости поверхности плавленого кварца и монокристаллического кремния от энергии и углов падения ионов Ar, Ne и Xe. Обнаружено пороговое поведение шероховатости поверхности от энергии ионов: при энергии, выше пороговой, было обнаружено сглаживание шероховатости поверхности;

2. Исследована структура и свойства приповерхностного «нарушенного» слоя, формирующегося в процессе ионной бомбардировки кварца и монокристаллического кремния. Пороговое поведение шероховатости поверхности монокристаллического кремния объясняется формированием квазиаморфной фазы в приповерхностном слое толщиной ~ 12 нм;

3. Разработан малогабаритный источник с фокусирующей ионно-оптической системой, накальным нейтрализатором и водоохлаждаемым кожухом, который позволил повысить скорость обработки в 7.5 раз без использования коллимирующей диафрагмы.

В конце отзыва делается заключение, что диссертация Михайленко Михаила Сергеевича соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Соискатель по теме диссертации имеет 25 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, 5 из которых приведены ниже:

1. Kumar N. Raman scattering studies of low energy Ar<sup>+</sup> ion implanted monocrystalline silicon for synchrotron applications / N. Kumar, V.A. Volodin, S.V. Goryainov, A.K. Chernyshev, A.T. Kozakov, A.A. Scrjabin, N.I. Chkhalo, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, M.V. Zorina // **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.** – 2023. – Vol. 534. – P. 97–102.
2. Malyshev I.V. High-aperture EUV microscope using multilayer mirrors and a 3D reconstruction algorithm based on z-tomography / I.V. Malyshev, D.G. Reunov, N.I. Chkhalo, M.N. Toropov, A. E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Tsybin, A.YA. Lopatin, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, R.M. Smertin, R.S. Pleshkov AND O.M. Shirokova // **Optics Express.** – 2022. Vol. 30. - No. 26. – P. 47567.
3. Mikhailenko M.S. Influence of ion-beam etching by Ar ions with an energy of 200-1000 eV on the roughness and sputtering yield of a single-crystal silicon surface/ M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, M.V. Zorina, A.K. Chernyshev, N.N. Salashchenko, I.I. Kuznetsov // **Applied Optics.** – 2022. V. – 61. – P. 10.
4. Mikhailenko M.S. Miniature source of accelerated ions with focusing ion-optical system / M.S. Mikhailenko, A. Pestov, N. Chkhalo, L. Goncharov, A. Chernyshev, I. Zabrodin, I. Kaskov, P. Krainov, D. Astakhov, V. Medvedev // **Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A.** – 2021. – Vol. – 1010. – P. 165554.
5. Mikhailenko M.S. X-ray scattering by the fused silica surface etched by low-energy Ar ions / M.S. Mikhailenko, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, Y.A. Vainer, P.A. Yunin, M.V. Zorina. // **Journal of X-Ray Science and Technology.** – 2019. - vol. 27. - no. 5. - P. 857-870.

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

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва (**положительных**):

**1) Бушуев Владимир Алексеевич**, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, профессор кафедры физики твердого тела физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в отзыве на автореферат диссертации отмечает, к наиболее

существенным научным результатам, полученных автором диссертации, можно отнести следующие результаты и положения, выносимые на защиту: 1) Определены параметры процесса травления (вид газа, энергия ионов и угол падения), развиты методы и разработано оборудование, которые позволяют проводить полировку, асферизацию и коррекцию локальных ошибок формы оптических элементов из плавленого кварца, бериллия и монокристаллического кремния с субнанометровой точностью и шероховатостью поверхности менее 0.3 нм в диапазоне пространственных частот  $4.9 \times 10^{-2} - 6.3 \times 10^{-1} \text{ мкм}^{-1}$ ; 2) Разработаны ионно-оптическая схема и система компенсации заряда пучка для источника ускоренных ионов с холодным катодом, которые обеспечивают повышение скорости травления в 7.5 раз без использования коллимирующей диафрагмы; 3) Показано, что влияние энергии ионов на шероховатость поверхности при ионно-пучковом травлении монокристаллического кремния носит пороговый характер и объясняется частичной аморфизацией приповерхностного слоя, причем при энергии выше пороговой реализуется сглаживание шероховатостей поверхности. **Отзыв не содержит замечаний.**

**2) Кузин Сергей Вадимович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией методов исследования Солнца малыми космическими аппаратами Федерального государственного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени «Институт солнечно-земной физики СО РАН» отмечает, что полученные наработки могут использоваться при подготовке подложек для микроэлектроники. **Отзыв не содержит замечаний.**

**3) Горай Леонид Иванович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории наноэлектроники Академического университета им. Ж.И. Алфёрова в отзыве на автореферат диссертации отмечает, что результаты работы востребованы и уже используются при создании зеркал рентгеновской оптики. С фундаментальной точки зрения, особенно интересным в выполненной работе, представляется исследование структуры и свойств нарушенного приповерхностного слоя, образующегося в

процессе ионной бомбардировки кварца и монокристаллического кремния.

**Отзыв не содержит замечаний.**

**4) Рогозин Евгений Николаевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук в отзыве на автореферат диссертации отмечает впечатляющий объём исследований, включая влияние вида ионов и их энергий, угла падения, а также кристаллографической ориентации кремния на коэффициенты распыления и поведение шероховатости поверхности при облучении пучками ускоренных ионов. Автор создал уникальный комплекс оборудования для ионно-пучковой обработки поверхности оптических элементов, с помощью которого провёл асферизацию и тонкие виды обработки поверхности. Ряд элементов используется, в частности, в экспериментах, проводимых в ИФМ РАН.

**Отзыв содержит 2 замечания:**

1. В формулировке Положения №3 допущена досадная опечатка: «...уменьшение размера пучка с 8.5 мм до 1.5 мм, что привело к росту скорости травления в 7.5 раз и **уменьшению** максимально доступной к обработке пространственной частоты до  $4.1 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>-1</sup>».
2. В тексте присутствуют необязательные англицизмы: имиджинг (построение изображений), рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния).

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных в том числе физике распыления твёрдых тел, изучению шероховатости поверхности, рентгеновской спектроскопии и разработке рентгенооптических систем (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Карасёв П.А. – более 10 публикаций, оппонент Асадчиков В.Е. – более 10 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработана методика** формирования подложек и рентгенооптических элементов из плавленого кварца, бериллия и монокристаллического кремния пучками ускоренных ионов, удовлетворяющие современным требованиям на точность формы с эффективной шероховатостью в диапазоне пространственных частот  $0.049 \text{ мкм}^{-1}$  до  $63 \text{ мкм}^{-1}$  менее  $0.3 \text{ нм}$ .

**Разработаны и запущены** две экспериментальные установки для проведения осесимметричной коррекции (асферизации) широкоапертурным источником с квазипараллельным ионным пучком, в том числе с возможностью работы с химически-активными газами. На одной из установок существует возможность замены широко-апертурного источника на источник с фокусировкой ионного пучка, что позволяет проводить процедуру коррекции локальных ошибок формы малоразмерным ионным пучком.

**Разработан источник ускоренных ионов** с рекордными для задач ионно-пучковой обработки оптических элементов параметрами. Фокусирующая ионно-оптическая система позволила получить минимальный размер ионного пучка (ширина на полувысоте до  $1.5 \text{ мм}$ ) без обрезających пучок диафрагм, что при токе ионов до  $1.5 \text{ мА}$  позволило получить рекордную плотность ионного тока до  $90 \text{ мА/см}^2$  и увеличить скорость травления плавленого кварца до  $0.5 \text{ мкм/мин}$ .

**Впервые показано** пороговое поведение развития шероховатости поверхности для основных ориентаций монокристаллического кремния от энергии ускоренных ионов неона, аргона и ксенона при ионном травлении.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:**

Разработанные методики и оборудование позволили создать рентгенооптические элементы дифракционного качества для систем нормального и скользящего падения. За счёт ионной полировки поверхности штриха нарезных и голографических дифракционных решеток удалось

повысить эффективность первого порядка дифракции до 30 раз в диапазоне длин волн 4.47 - 17.1 нм. Осесимметричная асферизация была применена для профилирования подложек зеркал солнечного телескопа ВУФ диапазона для наноспутников. Методом ионно-пучковой коррекции сформирована заготовка для подложки коллимирующей системы Киркпатрика-Баеза с точностью формы 0.7 нм по параметру СКО (среднее квадратичное отклонение). Изготовлены двойной кристалл-монокроматор и нанофокусирующая система для станции 1-1 «Микрофокус» синхротронного источника фотонов «СКИФ» (Новосибирск, Россия). С применением методик изготовлены подложки зеркал действующего ЭУФ микроскопа (ИФМ РАН, Нижний Новгород) на основе двухзеркального объектива Шварцшильда; системы изображения плазменного факела лазерно-плазменного источника на базе субпетаваттного лазера PEARL (ИПФ РАН). Повышена эффективность детекторов на основе микроканальных пластин, которые применяются в приборах ночного видения, усилителях слабого сигнала, а также в фотоприемных устройствах для научного применения, в т.ч. для астрофизических проектов.

#### **Оценка достоверности результатов исследования:**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием для их получения ряда апробированных в ИФМ РАН и других мировых лабораториях экспериментальных методик и подкрепляется хорошим согласием эксперимента и теории. Основные результаты работы докладывались на ряде международных конференций.

**Личный вклад соискателя** в исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, подготовка и исследование образцов, анализ и обобщение полученных результатов, написание и публикация статей, активное участие в конструировании и запуске стендов для ионно-пучковой коррекции формы. Написание алгоритмов для расчета масок на языке Python и численного моделирования процесса физического распыления с учетом эволюции поверхности на языке C++.



**В ходе защиты диссертации** официальным оппонентом П.А. Карасёвым было высказано следующее замечание:

«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?».

Соискатель Михайленко М.С. в своём ответе сообщил, что

«В диссертационной работе не проводился анализ состава поверхности, однако изучался послойный анализ (т.н. динамический режим ВИМС) ускоренными ионами Cs с энергией 1 кэВ. В таком случае выход на стационарный режим работы достигается при распылении поверхности порядка нескольких длин проекционного пробега (2-3 нм). Так как в нашем случае глубина залегания ионов Ag в плавленом кварце входила в диапазон выхода на стационарный режим (2.4 нм), то количественный анализ проводить некорректно, однако, информация о глубине залегания не искажается и проверяется по глубине кратера.»

Официальный оппонент В.Е. Асадчиков высказал следующее замечание:

«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 Physical Review B 2012. V. 85 P. 125439. Этот подход основан на решении обратной задачи рентгеновской рефлектометрии»

Соискатель Михайленко М.С. в своём ответе сообщил, что


«Спасибо, за ценную ссылку на работу! Действительно, в предложенной работе предлагается метод восстановления структуры нарушенного слоя более детальный, однако, в рамках диссертационной работы, использовалось приближение, которое позволило с хорошей точностью определить глубину и ширину нарушенного слоя, которая согласуется с измерениями ВИМС.»

На заседании 19.12.2024 г. диссертационный совет, за проведённые исследования процессов взаимодействия ионных пучков с поверхностями различных материалов, исследованию нарушенного слоя, впервые показавшего пороговое поведение развития шероховатости поверхности для основных ориентаций монокристаллического кремния от энергии ускоренных ионов инертных газов, разработке методик и оборудования для коррекции формы и полировки подложек элементов рентгеновской оптики принял решение присудить Михайленко М.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

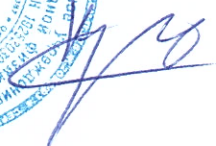
При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов науки по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0.

Председатель  
диссертационного совета



 Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

 Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 19.12.2024 г.