

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический ИНСТИТУТ



имени

П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, ГСП-1

Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: +7 (499) 135 14 29

+7 (499) 132 65 54

Телефакс: +7 (499) 135 78 80

E-mail: office@sci.lebedev.ru

www.lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

по научной работе

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук (ФИАН)

Доктор физ. - мат. наук, профессор

В.А. Рябов



30.10.2024

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития электроники является переход к структурным элементам, размеры которых лежат в области нанометров. Именно на основе таких структур разрабатываются современные устройства микро- и нанoeлектроники. Одним из методов создания наноразмерных наноструктур является рентгеновская литография, разработке которой в нашей стране уделяется огромное внимание и значение. Одной из важнейших задач создания как элементов рентгеновского литографа, так и наноструктур, получаемых в результате такой литографии, становится получение сверхгладких поверхностей с шероховатостью не более 0.2-0.5 нм, поскольку только на таких качественных поверхностях могут быть выращены контролируемым и воспроизводимым способом структуры, размеры которых лежат в области нанометров. Поэтому актуальной становится задача поиска методов получения сверхгладких поверхностей (подложек), которые бы не только доводили шероховатость поверхности до уровня 0.2-0.5 нм, но и существенно не изменяли физических свойств приповерхностного слоя подложки, а именно, не вносили дополнительные структурные и радиационные дефекты. Рассматриваемая диссертационная работа Михайленко Михаила Сергеевича как раз и посвящена поиску и

разработке методов получения сверхгладких поверхностей (шероховатостью менее 0.3 - 0.5 нм) для оптических элементов рентгеновской оптики. В связи со сказанным выше, очевидно, что уже сама тема диссертации является актуальной.

В диссертационной работе автор всесторонне исследует метод ионного распыления в качестве способа получения сверхгладких подложек с минимальной шероховатостью и нужного профиля с перспективой создания методик формообразования и полировки пучками ускоренных ионов и разработке соответствующего оборудования.

Для решения поставленных в работе цели и задач Михайленко М.С. было исследовано влияния вида газа, углов падения, кристаллографической ориентации подложек и энергии ионов (в диапазоне 0.1 - 1.5 кэВ) на коэффициенты распыления и поведения шероховатости поверхности перспективных материалов при облучении пучками ускоренных ионов. Важной особенностью работы является разработка автором специализированного оборудования для ионно-пучковой обработки поверхности оптических элементов.

Диссертационная работа Михайленко М.С. состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников литературы, содержащей 177 наименований. Общий объем диссертации составляет 180 страниц, включая 6 таблиц и 100 рисунка. По теме диссертации имеется 25 публикаций в рецензируемых научных и специализированных изданиях, имеется два патента на изобретение. Промежуточные этапы исследования обсуждались на научных конференциях.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, поставлена задача и определены основные направления исследований. Там же сформулированы практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и личный вклад в работу автора диссертации. Указывается структура и объем диссертации и публикации по теме в журналах и сборниках.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по ионно-пучковому травлению (распылению). Здесь описывается метод ионно-пучкового травления и его воздействия на модификацию формы и шероховатости поверхности твердых тел. Также дается описание принципов работы источников ускоренных ионов для проведения процедуры коррекции формы поверхности оптических элементов и приведены основные требования к оптическим элементам современной рентгеновской оптики.

Во **второй главе** описан стенд для изучения коэффициентов распыления, методы измерений и приборы для изучения шероховатости поверхности и нарушенного слоя. Здесь же проанализированы возможности ионно-пучкового травления для создания технологии формирования прецизионных рентгенооптических элементов с атомарно

гладкой поверхностью. В главе приведены результаты исследования зависимости коэффициентов распыления и шероховатости поверхности плавленого кварца от энергии и углов падения ионов аргона в диапазоне энергий до 1.5 кэВ. Обнаружено, что ионно-пучковое травление ионами Ag с энергией 1250 эВ позволяет получать шероховатость оптических элементов лучше 0.3 нм. Важным результатом является обнаружение порогового характера поведения шероховатости от энергии ионов, т.е. существует диапазон энергий ионов, при которых шероховатость сглаживается, и диапазон энергий, при которых, наоборот, наблюдается рост шероховатости. Пороговая зависимость была объяснена появлением квазиаморфной (модифицированной) фазы в приповерхностном слое толщиной ~ 12 нм.

Третья глава посвящена описанию методики коррекции формы поверхности оптических элементов с применением ионно-пучкового травления, в частности, принцип коррекции локальных ошибок формы поверхности, описана программа расчета формирующего ионный пучок масок. Также рассмотрено покрытие для поверхностей, не поддающихся механической и ионной полировке, испытанное на плёнках и массивном бериллии.

В четвертой главе описаны две установки ионно-пучкового травления для проведения локальной коррекции ошибок формы и симметричной обработки поверхности, а также приведено описание источника ускоренных ионов с фокусирующей ионно-оптической системой. Разработанные методики и оборудование позволили создать ряд оптических элементов для изображающих систем нормального падения, а также для систем, работающих в геометрии скользящего падения. Так, ионно-пучковой полировкой поверхности штриха дифракционных решеток удалось повысить эффективность первого порядка дифракции до 30 раз в диапазоне длин волн 4.47 - 17.1 нм.

Пятая глава посвящена предложенной автором модели описания процесса физического распыления аморфной однокомпонентной мишени. Для ионов аргона приведены результаты моделирования зависимости коэффициента распыления и шероховатости поверхности для аморфного кремния. Так, было рассчитано изменение шероховатости поверхностей аморфного кремния после травления ионами аргона с энергией 800 эВ под нормалью и под углом 60 градусов. В результате проведенного эксперимента при травлении под нормалью подложка сгладилась от начальных 0.12 нм до 0.1 нм, как и в расчёте, а под углом, напротив, ухудшилась до 0.13 нм.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы Михайленко М.С. можно отнести следующее:

- проведено систематическое изучение поведения коэффициентов распыления и шероховатости поверхности плавленного кварца и монокристаллического кремния от энергии и углов падения ионов Ag, Ne и Xe. Обнаружено пороговое поведение шероховатости поверхности от энергии ионов: при энергии, выше пороговой, было обнаружено сглаживание шероховатости поверхности;

- 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;

- 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;

Стоит отметить большой объем и качество проведенных исследований процессов ионно-пучкового распыления и использование полученных экспериментальных и теоретических данных для получения низкошероховатых поверхностей, которые предполагается использовать для создания высококачественных элементов рентгеновской оптики.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигнуты использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами в области разработки и исследований различных элементов рентгеновской оптики.

Материалы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня, утвержденного ВАК.

По работе М.С. Михайленко можно сделать следующие уточняющие замечания:

1. При бомбардировке поверхности монокристаллического кремния ионами Ag, как отмечает автор, возникает квазиаморфная фаза толщиной ~ 12 нм. Однако, толщина и структура нарушенного слоя может зависеть от энергии ионов Ag и времени воздействия облучения. Так, при малых энергиях ионов Ag может и не происходить аморфизации поверхностного слоя Si, а возникать тонкий слой кристаллического кремния другой кристаллической структуры (например, реконструкция поверхности). Влияют ли такие фазы на шероховатость поверхности?

2. Хотелось бы, чтобы автор более подробно описал физические причины уменьшения шероховатостей поверхности под действием ионной бомбардировки. В частности, имеет ли место поверхностная диффузия атомов шероховатостей под действием ионной бомбардировки, которая может приводить к сглаживанию шероховатостей поверхности?

3. Поскольку при распылении поверхности плавленного кварца (или другой многокомпонентной поверхности) ионы Ag выбивают отдельные атомы Si и O, то, что понимается под коэффициентом распыления кварца?

4. Имеют ли место эффекты «вбивания» при ионном травлении поверхности кварца и если они существуют, то при каких условиях это происходит и оказывают ли они существенное влияние на возникновение дополнительной шероховатости?

5. Хотелось бы, чтобы автор привел возможные физические механизмы резкого изменения шероховатости поверхности кристаллического Si различной ориентации при низкой (~ 400 эВ) энергии ионов Ag. Кстати, можно видеть примерно подобное поведение шероховатости в области низких (400-500 эВ) энергий Ag и для плавленого кварца (см. Рис.2.5).

Однако, приведенные замечания ни в коем случае не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа Михайленко М.С. является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. По материалам диссертации опубликовано 25 работ, входящих в перечень ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Получено 2 патента Российской Федерации (патенты №2793080 и №2810680).

Автореферат достоверно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Тема диссертационной работы **Михайленко Михаила Сергеевича**, ее содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором результаты и их анализ соответствуют паспорту специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013г., а ее автор, **Михайленко Михаил Сергеевич**, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составлен главным научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего отделом физики полупроводников и наноструктур Отделения физики твердого тела (ОФТТ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), доктором физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния Пудониным Федором Алексеевичем.

Доклад Михайленко М.С. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре Отделения физики твердого тела (ОФТТ) ФИАН; отзыв на диссертационную работу одобрен на заседании Ученого совета ОФТТ ФИАН, протокол № 07/24 от 25 октября 2024 г.

Главный научный сотрудник, исполняющий
Обязанности зав. Отдела физики полупроводников
и наноструктур ОФТТ ФИАН,
доктор физико-математических наук
тел. +7(499)132-67-57,
pudoninfa@lebedev.ru

Пудонин Федор Алексеевич

Ведущий научный сотрудник, исполняющий
обязанности руководителя ОФТТ ФИАН,
доктор физико-математических наук
тел. +7(499) 132-64-48
krivobokvs@lebedev.ru

Кривобок Владимир Святославович

Подписи Ф.А. Пудонина и В.С. Кривобока заверяю:
ученый секретарь ФИАН
кандидат физико-математических наук

Колобов Андрей Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. +7(499)135-42-64, факс +7(499)135-78-80, <http://www.lebedev.ru/>; office@lebedev.ru