

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19 декабря 2023 г № 56

О присуждении Бусарову Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов» по специальности 1.3.6 — Оптика принята к защите 9 октября 2023 года (протокол заседания № 54) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Бусаров Александр Сергеевич, 22 июля 1989 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) по специальности «Физика атомного ядра и частиц». С 2013 года обучался в аспирантуре ФИАН по направлению «Физика и астрономия» и закончил её в 2017 году. Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2023 году. С 2016 г. работает в ФИАН в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника в лаборатории рентгеновской оптики Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова (ОКРФ).

Диссертационная работа А. С. Бусарова выполнена в ОКРФ ФИАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Виноградов Александр Владимирович, высококвалифицированный главный научный сотрудник ОКРФ ФИАН.

Официальные оппоненты:

1. Горай Леонид Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Центра приоритетных направлений науки и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»;
2. Бузмаков Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института кристаллографии им А.В. Шубникова – Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук» (ИПТМ РАН), Московская область, город Черноголовка, в своем положительном отзыве, составленном заместителем директора по научной работе ИПТМ РАН, кандидатом физико-математических наук Иржаком Дмитрием Вадимовичем и утвержденном доктором физико-математических наук, член-корр. РАН Рощупкиным Дмитрием Валентиновичем, и. о. директора ИПТМ РАН, указала, что диссертация удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликовано 6 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем А. С. Бусаровым работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

1. I. A. Artyukov, A. S. Busarov, N. L. Popov, and A. V. Vinogradov, "Optical Transforms Related to Coherent Imaging of Inclined Objects," in X-Ray Lasers 2012 (Springer International Publishing, 2014), pp. 19-27.
2. И. А. Артюков, А. С. Бусаров, А. В. Виноградов, Н. Л. Попов, "О получении уменьшенных рентгеновских изображений при отражении излучения от шаблона под критическими углами", Квантовая электроника, 46 (9), 839–844 (2016).
3. И. А. Артюков, А. С. Бусаров, А. В. Виноградов, Н. Л. Попов, "О лазерной отражательной рентгеновской микроскопии наклонных объектов", Квантовая электроника, 48 (7), 662–666 (2018).
4. А. С. Бусаров, А. В. Виноградов, Н. Л. Попов "2D-моделирование когерентных изображений наклонных объектов", Краткие сообщения по физике. 43 (4), 3-11 (2016).
5. I. A. Artyukov, A. Busarov, N. L. Popov, and A. V. Vinogradov, "The approach to reflection x-ray microscopy below the critical angles," Proc. SPIE 10243, 1024311 (2017).

Выбор Горая Леонида Ивановича в качестве оппонента обоснован его высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области нанотехнологий, а также дифракционной оптики рентгеновского и видимого диапазонов.

Выбор Бузмакова Алексея Владимировича в качестве оппонента обоснован его высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области рентгеновской микроскопии и томографии и их приложений.

Выбор ведущей организации обоснован тем, что ИПТМ РАН является одним из ведущих разработчиков и производителей в нашей стране дифракционной и преломляющей рентгеновской оптики. В течение многих лет ведёт исследования по физике и применению рентгеновского излучения с использованием лабораторных и синхротронных источников.

Диссертационная работа Бусарова А.С. посвящена разработке теории оптических преобразований при наклонном освещении объектов и развитию методов моделирования изображающих оптических систем в такой геометрии.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что во многих задачах нанопластики и нанотехнологий наблюдения ведутся с помощью излучения с энергией фотонов 0,1-10 кэВ. В указанном рентгеновском диапазоне энергий коэффициент отражения для всех материалов при нормальном падении не превосходит десятые доли процента, но при углах скольжения, близких к углу полного внешнего отражения, коэффициент отражения составляет десятки процентов. Поэтому возникает задача получения рентгеновских изображений материалов и поверхностных структур под малыми углами скольжения.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. При помощи дифракционного интеграла, полученного ранее И.А. Артюковым, А.В. Виноградовым и Н.Л. Поповым, найдено выражение для оптического преобразования, определяющее ориентацию, амплитуду и фазу изображений наклонных объектов. Это оптическое преобразование дает возможность моделировать в том числе фазовые объекты.

2. Применяя найденное оптическое преобразование, было показано, что наилучшее качество изображения наклонного объекта достигается на наклонной плоскости, оптически сопряженной с плоскостью расположения

объекта. Была получена формула, связывающая амплитуду и фазу полей на объекте и детекторе в двумерном и трехмерном случаях.

3. В рамках данного теоретического подхода предложена новая схема оптической литографии с наклонной отражающей маской и освещением шаблона когерентным рентгеновским пучком под скользящими углами меньше критического угла ( $0.1 - 20^\circ$ ). Преимущество схемы - возможность использования наклонных отражающих масок с длиной волны 0.1-50 нм, в том числе, когда многослойная рентгеновская оптика нормального падения становится малоэффективной либо неприемлемо дорогой.

4. В качестве применения предложенного теоретического подхода также рассмотрена схема отражательного рентгеновского микроскопа, работающего при малых скользящих углах падения излучения на объект. При такой оптической схеме снимаются ограничения, которые связаны с низкой отражательной способностью исследуемых образцов в диапазоне длин волн короче 20 нм. Данный микроскоп по сравнению с простейшей схемой, основанной на одном оптическом элементе нормального падения, обладает равномерной резкостью по всему полю зрения, однако теряет в разрешении.

5. Проведена оценка пространственного разрешения с помощью численного моделирования на длине волны излучения 13.9 нм для предложенных схем литографии и микроскопии.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Новизна обусловлена тем, что:

- получена формула оптического преобразования для тонкой линзы, которое связывает поля в плоскостях объекта и детектора при наклонном положении объекта и детектора в параболическом приближении;

- с применением развитого теоретического подхода был разработан метод анализа и моделирования волновых процессов в оптических схемах рентгеновской микроскопии и литографии при наклонном освещении объектов.

Такой подход позволяет получать рентгеновские изображения в тех случаях, когда многослойная оптика становится малоэффективной.

Значение полученных соискателем результатов обусловлено возможностью их использования при разработке новых схем рентгеновской микроскопии и промышленной литографии. Научная значимость работы заключается в существенном развитии волновой теории оптических преобразований изображающих систем с наклонным расположением объектов и подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях. Полученные результаты могут быть использованы в области рентгеновской оптики, а также могут быть интересны для научных групп, занимающихся разработкой оптики и других инструментов для когерентных источников рентгеновского излучения (источники синхротронного излучения СКИФ, СИЛА).

Высокая степень достоверности приведенных в работе выводов и научных положений подтверждается совпадением результатов при использовании различных аналитических и численных методов, представлением и успешным обсуждением результатов на семинарах и международных научных конференциях.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Бусарова А. С., получены лично автором либо при его непосредственном участии. В частности, автор лично вывел формулу для оптического преобразования, обобщающую интеграл дифракции Френеля на случай объектов, расположенных под произвольным углом к оптической оси при наличии фокусирующего оптического элемента, и выполнил численное моделирование оптического переноса изображений масок и тест-объектов, освещаемых наклонными пучками. Подготовка результатов к публикации проводилась совместно с соавторами.

В ходе защиты соискатель Бусаров А. С. аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 19 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение присудить А. С. Бусарову учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи по обоснованию и разработке методов моделирования изображений наклонных объектов.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.6 — Оптика), участвовавшие в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени - 18,  
против присуждения учёной степени - 2,  
недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Золотко Александр Степанович

19 декабря 2023 г.