

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Горая Леонида Ивановича

на диссертационную работу **Бусарова Александра Сергеевича**

«Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика»

Актуальность работы. Создание рентгеновских лазеров на свободных электронах и ускорительных источников излучения 4-го поколения, а также разработка мощных лабораторных источников приводит к тому, что когерентные рентгеновские пучки становятся все более доступными для многих исследователей и различных приложений. Применение когерентных источников рентгеновского излучения в микроскопии, особенно в окне прозрачности воды, создает ряд преимуществ и новых возможностей: метод восстановления фазы и безлинзовое получение изображений с дифракционным разрешением, снижение радиационной нагрузки на исследуемые объекты и возможность получения дифракционной картины или изображения с фемто- и аттосекундной выдержкой. Теоретические основы когерентной рентгеновской визуализации, включая дифракционный интеграл Френеля, хорошо развиты и обычно используется для достаточно тонких прозрачных объектов. Для непрозрачных объектов ведется поиск способов получения когерентных изображений методами отражательной микроскопии. Поскольку речь идет о рентгеновском излучении (от жесткого рентгена до экстремального УФ), то освещение объектов должно происходить под малыми углами скольжения, близкими к углу полного внешнего отражения. В связи с вышеизложенными соображениями следует признать актуальной целью настоящей работы – теоретически исследовать возможность получения уменьшенных (для задач литографии) либо увеличенных (для задач микроскопии) рентгеновских изображений объектов, освещаемых при наклонных углах падения.

Структура и содержание диссертации

Работа включает в себя четыре главы, заключение и пять приложений. Текст диссертации, включая приложения изложен на 118 страницах, содержит 4 таблицы и 45 рисунков.

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, связанной с получением рентгеновских изображений наклонно расположенных объектов, поставлены ее цели и задачи, сформулированы, выносимые на защиту положения, сформулированы новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. Глава начинается с вывода параболического волнового уравнения (ПВУ) как параболического приближения точного скалярного уравнения Гельмгольца. Затем приведены решения ПВУ для разных граничных условий в двумерной и трехмерной геометрии. В случае с вертикальным граничным условием речь идет о хорошо известном интеграле Френеля, а в случае наклонного граничного условия – об АВП-интеграле, предложенном И.А. Артюковым А.В. Виноградовым и Н.Л. Поповым в 2009 году. Рассмотрен численный метод расчета интеграла Френеля с помощью преобразования Фурье. Глава завершается кратким обзором литературы по рентгеновской оптике.

Во **второй главе** с помощью методов волновой оптики показано, что плоскость, на которой изображение будет наиболее подобным объекту, совпадает с известной в геометрической оптике оптически сопряженной плоскостью, и найдена формула для распределения поля на этой плоскости при заданном распределении поля на объекте. Сначала в главе разобран известный в литературе вывод распределения в плоскости изображения методами волновой оптики для вертикально расположенного объекта. Затем автор, оставаясь в рамках параболического приближения, рассматривает случай наклонно расположенного объекта. В результате получена формула, связывающая поле на объекте и в плоскости изображения. В завершение для выведенной формулы проанализированы предельные случаи.

В **третьей главе** с помощью предложенного во второй главе теоретического метода был предложен подход для рентгеновской литографии с отражающей маской. Проведено численное моделирование предложенной схемы для длины волны 13.9 нм и получены оценки разрешения и поля зрения методом 10%–90%.

В **четвертой главе** на основе развитого во второй главе подхода представлена оптическая схема рентгеновского микроскопа с использованием дифракционной решетки, работающего на отражении от объекта под скользящими углами. Посредством численного моделирования выполнены расчеты изображений стандартных тест-объектов для оценки поля зрения и пространственного разрешения в данной схеме при различных углах наклона и числовых апертур фокусирующих элементов.

Заключение содержит основные результаты работы.

Применение различных аналитических и численных методов обеспечивает **достоверность и обоснованность полученных результатов**. Автор диссертации уверенно владеет соответствующим математическим аппаратом. Результаты и выводы, полученные автором, докладывались и обсуждались на международных научных конференциях и семинарах.

Научная и практическая значимость полученных результатов работы заключается в том, что на основе параболического волнового уравнения развита теория когерентного переноса изображений наклонных объектов при скользящих углах освещения. Представлено новое оптическое преобразование, связывающее распределения полей изображения и объекта. Основываясь на данном преобразовании, был разработан теоретический метод анализа и проведено моделирование волновых процессов в схемах рентгенооптических систем для микроскопии и литографии при наклонном освещении объектов. Что позволяет получать рентгеновские изображения, в тех случаях, когда многослойная оптика становится малоэффективной, например, в диапазоне длин волн 0.1–4 нм.

Замечания по работе

1. С. 63. «В этой главе предложен новый метод рентгеновской литографии [89-91] с отражающей маской, а также приведены результаты численного моделирования. В расчетах мы ограничимся применением когерентных источников с длиной волны ~ 13 нм. Этот диапазон в настоящее время освоен как лабораторными рентгеновскими лазерами [92], так и генераторами гармоник ИК-лазеров [93], в связи с чем можно говорить об экспериментальной апробации предлагаемого метода.» Выражение «В этой главе предложен новый метод рентгеновской литографии [89-91] с отражающей маской...» – крайне неудачное. Во-первых, автор диссертации не имеет отношения к процитированным им статьям и к рентгеновской литографии с отражающей маской. Во-вторых, в работе обосновывается только возможность использования предложенного теоретического метода (замечу – приближенного) для задач литографии на отражение в скользящем падении. В-третьих, об экспериментальной апробации предложенной модели можно говорить только при прямом сравнении результатов, полученных в теории и эксперименте. Этого в диссертации, к сожалению, нет.

2. В главе 3 на рис. 29 приведена оптическая схема литографической установки на отражение в скользящем падении, а далее приведен численный расчет этой схемы с некоторыми параметрами: «Приведем результаты расчета

оптической схемы, обеспечивающей эффективное отражение излучения 13.9 нм на шаблон и в тоже время близкое к нормальному падение излучения на детектор, обеспечивающее эффективное поглощение, а также найдем ее разрешение». Однако, расчет делается на основе идеальных параметров источника, линзы и детектора, чего в оптике не бывает, а для длины волны излучения 13.9 нм не бывает от слова «совсем». В работе никак не обсуждается использование реалистичных компонент подобной оптической схемы, например, с оловянно-плазменным источником и линзой Френеля, а также как их параметры могут повлиять на оценки разрешения и интенсивности, полученные в работе. К сожалению, в диссертации также обойден вопрос про aberrации рассматриваемых оптических систем, которые в случаях скользящего падения могут быть большими.

3. В главе 4 приведены результаты расчетов нескольких новых схем коротковолновой микроскопии с наклонным (скользящим) падением и использованием параметров тонких идеальных линз с различным относительным отверстием и идеальных фазовых дифракционных решеток. На с. 81 диссертационной работы приведено следующее замечание: «Отметим, что оптические элементы – линзы и дифракционная решетка, которые присутствуют в данной схеме и для которых проводилось численное моделирование, считались идеальными и характеризовались фазовыми экранами». Далее в тексте диссертации обсуждается возможное влияние некоторых параметров реалистичных решеток на полученные автором результаты. Однако, параметры реалистичных линз, которые могут использоваться для исследованных оптических схем на длине волны 13.9 нм никак не обсуждаются. Отсюда возникает два вопроса. (1) Какие существующие линзы (тип, материал) могут использоваться в рассмотренных схемах? (2) Как может повлиять на результаты проведенных расчетов учет параметров (каких?) наиболее подходящих реалистичных линз?

4. В работе нет сравнения предложенной теоретической модели на основе АВП-интеграла и любых других моделей – более или менее точных – ни по точности, ни по скорости, ни по компьютерной ресурсоемкости.

5. В тексте и рисунках диссертационной работы имеется достаточное число опечаток, неточностей и стилистических ошибок. Некоторые из них, носящие методологический и терминологический характер, необходимо отметить:

- с. 16 и др. «Этот дифракционный интеграл и его обобщение на случай ПВУ с наклонным относительно вектора k граничным условием, – АВП-интеграл [18] составляют основу для расчетов в данной работе». Термин «наклонным ... граничным условием» или «наклонным расположением граничного

условия» повсеместно применяется в диссертации. Хотя смысл его использования понятен, но граничное условие – понятие математическое, а не физическое. Оно не бывает «наклонным». Правильно говорить «граничное условие при падении излучения под углом» или «граничное условие при расположении объекта под наклоном относительно вектора $k^{\vec{}}$ ».

- с. 24 и формула 23. Интегралами Френеля обычно называют другие математические выражения. Правильно называть интеграл, который широко используется в диссертационной работе, интегралом дифракции Френеля или дифракционным интегралом Френеля. Он является приближением известного скалярного интеграла Зоммерфельда-Релея, а не спецфункцией – интегралом от 0 до x от синуса или косинуса квадрата аргумента, что и, собственно, называется интегралом Френеля в математике.

- с. 49-51 и др. На рисунках и в тексте глав 2 и 3 повсеместно одними и теми же символами обозначены точки, прямые, переменные (координаты) и функции – это относится к символам s , s' , s^* и др., например: «Рисунок 22. Построение изображения точки s с помощью двух лучей по правилам геометрической оптики. ...На рисунке 23 прямая s' является сопряженной к прямой s ... После соответствующих вычислений можно найти явный вид для $s'(s)$: $s'(s) = b^2 f s \cos\theta / [a(a f + b s \cos\theta) \cos\theta']$, ...». Замечание в сноске, которое сделано в конце с. 51 ничего не меняет в этой жуткой путанице: «¹⁰В дальнейшем, чтобы избежать путаницы, функция $s(s')$ будет обозначаться как $s*(s')$ или просто $s*$.»

- с. 50 и др. Формулы в каждой главе нумеруются сначала, а ссылки на них по тексту диссертации даются как с учетом номера главы, так и без учета этого номера, что приводит к путанице.

- с. 60-61. Обозначения в формуле 33 главы 2 не расшифрованы – ссылки на соответствующую литературу недостаточно. То же самое относится к выражению 38 в этой главе.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают её высокого научного уровня.

Общая оценка работы

Диссертация А.С. Бусарова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на хорошем уровне, что подтверждает высокую квалификацию соискателя в рассмотренной области. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Диссертация написана хорошим научным языком. Содержание

диссертации соответствуют специальности 1.3.6 – «Оптика». Работа написана на актуальную тему, её результаты являются принципиально новыми и оригинальными, обладают практической значимостью, прошли апробацию на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Заключение

Диссертация Бусарова Александра Сергеевича "Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов" отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Бусаров Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Доктор физ.-мат. наук (01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»), г.н.с. Центра приоритетных направлений науки и технологий ФГБУВОН Академического университета имени Ж.И. Алфёрова

Согласен с обработкой персональных данных,

Горай Леонид Иванович


30 ноября 2023 г.

194021, Санкт-Петербург,
ул. Хлопина, д.8, корпус 3, лит. А
тел.: +7-812-448-6980 доб. 5658; e-mail: lig@pcgrate.com

Подпись официального оппонента д.ф.-м.н. Горая Л.И. заверяю:
Проректор по науке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН




Егоров Антон Юрьевич

30 ноября 2023 г.

Список основных работ официального оппонента Горая Леонида Ивановича по тематике диссертации А.С. Бусарова "Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Л. И. Горай, В. А. Шаров, Д. В. Мохов, Т. Н. Березовская, К. Ю. Шубина, Е. В. Пирогов, А. С. Дашков, А. Д. Буравлев, "Кремниевые решетки с блеском для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения: влияние формы профиля штриха и случайной шероховатости на дифракционную эффективность," ЖТФ, 93(7), 859–866 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55738.66-23
2. L. I. Goray, "Rigorous accounting diffraction on non-plane gratings irradiated by non-planar waves," J. Opt. 24(2), 025601 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac4438>
3. L. Goray, "Absorption and scattering by structured interfaces in X-rays," J. Synchrotron Rad. 28, 196–206 (2021). <https://doi.org/10.1107/S160057752001440X>
4. L. I. Goray, E. V. Pirogov, M. V. Svechnikov, M. S. Sobolev, N. K. Polyakov, L. G. Gerchikov, E. V. Nikitina, A. S. Dashkov, M. M. Borisov, S. N. Yakunin, A. D. Bouravlev, "High-Precision Characterization of Super-Multiperiod AlGaAs/GaAs Superlattices Using X-Ray Reflectometry on a Synchrotron Source," Tech. Phys. Lett., 47(8), 745–748 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021080071
5. L. I. Goray, T. N. Berezovskaya, D. V. Mokhov, V. A. Sharov, K. Yiu. Shubina, E. V. Pirogov, A. S. Dashkov, "Blazed Diffraction Gratings on Si - First Results," Technical Physics, 2021, Vol. 91, No. 10, 1538–1547 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51368.81-21
6. L. Goray, E. Pirogov, M. Sobolev, I. Ilkiv, A. Dashkov, E. Nikitina, E. Ubyivovk, L. Gerchikov, A. Ipatov, Yu. Vainer, M. Svechnikov, P. Yunin, N. Chkhalo, A. Bouravlev, "Matched characterization of super-multiperiod superlattices", J. Phys. D: Appl. Phys. 53, 455103 (9pp) (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aba4d6>
7. L. I. Goray, E. V. Pirogov, M. S. Sobolev, N. K. Polyakov, A. S. Dashkov, M. V. Svechnikov, A. D. Buravlev, "Deep X-Ray Reflectometry of Supermultiperiod A3B5 Structures with Quantum Wells Grown by Molecular-Beam Epitaxy, Tech. Phys. 65(11), 1822–1827 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110134
8. M. Lubov and L. Goray, "High-efficiency X-ray multilayer-coated blazed gratings with shifted boundaries," J. Synchrotron Rad. 26, 1539–1545 (2019). <https://doi.org/10.1107/S1600577519006337>
9. L. I. Goray, V. E. Asadchikov, B.S. Roshchin, Yu.O. Volkov, and A.M. Tikhonov, "First detection of x-ray whispering gallery modes at the surface meniscus of a rotating liquid," OSA Continuum 2(2) (2019): <https://doi.org/10.1364/OSAC.2.0004603>.
10. L. I. Goray, E. V. Pirogov, M. S. Sobolev, I. V. Ilkiv, A. S. Dashkov, Yu. A. Vainer, M. V. Svechnikov, P. A. Yunin, N. I. Chkhalo, A. D. Bouravlev. Matched X-Ray Reflectometry and Diffractometry of Super- Multiperiod Heterostructures Grown by Molecular Beam Epitaxy. Semiconductors 53(14), 1910–1913 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619140082.
11. L. Goray, W. Jark, D. Eichert, "Rigorous calculations and synchrotron radiation measurements of diffraction efficiencies for tender X-ray lamellar gratings: conical versus classical diffraction," J. Synchrotron Rad. 25, 1683-1693 (2018). <https://doi.org/10.1107/S1600577518012419>