

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Алексея Владимировича Бузмакова

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»

Потребность исследования поверхностей различных материалов и процессов на наномасштабах, в том числе абляции, фазовых переходов, процессов самоорганизации, физико-химических превращений и др. нуждается в излучении, которое позволит достигать высокого пространственного разрешения. Во многих задачах нанопластики и нанотехнологий наблюдения ведутся с помощью излучения с энергией фотонов 0,1-10 кэВ, которое обеспечивает высокое пространственное разрешение и обладает высокой проникающей способностью. В этом диапазоне энергий часто исследуются поверхности и плёнки на них, поэтому перспективным кажется получать рентгеновские изображения с помощью микроскопа, использующего отражение от поверхности образца. Однако, при таких длинах волн существенная доля излучения отражается лишь при малых углах скольжения, поэтому автором рассматривается идея создания рентгеновского микроскопа, работающего на отражении при скользящих углах. Использование же оптической схемы с уменьшением может найти применение в технологии микроэлектроники и микролитографии. Предложенный автором метод моделирования наклонных изображений может позволить оптимизировать рентгенооптические схемы для получения оптимального разрешения.

Диссертационная работа построена классическим образом и состоит из введения, четырех глав, выводов и списка цитируемой литературы из 100 наименований, диссертация изложена на 118 страницах.

Во введении автором обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели исследований, мотивируется выбор длин волн для проведения исследований и необходимость применения наклонной геометрии расположения объекта и увеличивающих рентгенооптических элементов для повышения разрешающей способности рентгеновских микроскопов.

Первая глава представляет собой обзор современного состояния исследований в области моделирования распространения рентгеновского излучения с помощью параболического волнового уравнения (ПВУ), которое является параксиальным приближением точного уравнения Гельмгольца. Рассматриваются и анализируются случаи решения ПВУ при различных граничных условиях, включая горизонтальный и наклонный случаи. Разбирается метод вычисления интеграла Френеля с помощью сведения его к преобразованию Фурье. В заключение дается краткий обзор литературы по рентгеновской оптике.

Вторая глава посвящена выводу формул геометрической оптики методами волновой в параксиальном приближении. Рассматривается вспомогательный вопрос о построении оптически сопряженной прямой к данной относительно линзы, включая известный вывод формулы идеальной линзы методами волновой оптики в параболическом приближении (случай нормально расположенного объекта). В этой главе автор подробно рассматривает случай изображения наклонного объекта линзой.

Третья глава посвящена описанию оптической схемы для литографии. В этой главе предложен новый метод рентгеновской литографии с отражающей маской, а также приведены результаты численного моделирования. Автором выведена формула увеличения оптической системы в случае наклонного объекта. Проведено моделирование оптической системы в двумерном и трёхмерном случаях. Автором проведено численное моделирование изображения объекта в таких системах, что позволило не только получить изображение объекта, но и исследовать разрешение получаемой системы в

зависимости от числовой апертуры и латеральной координаты объекта. Показано, что искажения, вносимые линзой с конечной апертурой, можно разделить на два вида: во-первых, это равномерное размытие изображения, полученного идеальной линзой, и во-вторых, геометрическая тень конечной апертуры. Проведенный анализ показал, что использование когерентного излучения на длине волны ~ 13 нм позволяет получать уменьшенные изображения при освещении масок под скользящими углами. Показана возможность получения наноструктур с деталями размером $20 \div 30$ нм. Дифракция и наклон объекта никаких видимых искажений в подобие маски и ее изображения не вносят.

В четвёртой главе представлена оптическая схема рентгеновского микроскопа, работающего на отражении от объекта под скользящими углами. Схема позволяет преодолеть ограничения, связанные с низкой отражательной способностью исследуемых образцов. С помощью численного моделирования выполнены оценки пространственного разрешения и поля зрения. Модельные расчеты и сравнение с экспериментом приведены для лабораторных рентгеновских лазеров с длиной волны $\lambda=13.9$ нм.

Научная новизна определяется тем, что был разработан новый метод анализа и моделирования волновых процессов в оптических схемах рентгеновской микроскопии и литографии при наклонном и скользящем освещении объекта с использованием формул оптического преобразования для тонкой линзы. Получены формулы, связывающие поля в плоскостях объекта и детектора, при этом учитывается наклонное положение объекта и детектора. Благодаря этому возможно обойтись без применения многослойной рентгеновской оптики нормального падения.

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 научных конференциях и семинарах.

По диссертационной работе А.С. Бусарова можно сделать следующие замечания:

- 1) В диссертационной работе моделирование фокусирующего оптического элемента проводилось с помощью фазового экрана, не учитывающего порядки дифракции, которые должны были бы быть у зонной пластинки Френеля. Поэтому возникает естественный вопрос, как применить теорию автора в этом случае?
- 2) В формуле (34) на стр. 60 свойством подобия объекту обладает только первое слагаемое. Какова роль второго слагаемого?
- 3) При определении пространственного разрешения оптической системы в главе 3 использовался метод 10%-90%. Сравнивались ли полученные результаты с часто применяемым в таких случаях методом MTF (modulation transfer function)?

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки материала диссертации. Считаю, что соискателем выполнена полезная научная работа, которая безусловно вносит вклад в дальнейшее развитие методов рентгеновской оптики в микроскопии и литографии.

Диссертация хорошо оформлена. Многочисленные рисунки исчерпывающим образом иллюстрируют основные положения и выводы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на отечественных и зарубежных конференциях и получили высокую оценку специалистов. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.6 – «Оптика». Автореферат и опубликованные статьи полностью соответствуют содержанию работы.

Считаю, что по объему полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости диссертация Бусарова Александра Сергеевича "Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов" удовлетворяет 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, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

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).

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59

Телефон: +7 903 015-06-18

E-mail: buzmakov@gmail.com

Я, Бузмаков Алексей Владимирович даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

23 ноября 2023 г.



Подпись Бузмакова Алексея Владимировича удостоверяю
учёный секретарь
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН



Крюкова Алёна Евгеньевна

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

1. Buzmakov A., Chukalina M., Dyachkova I., Ingacheva A., Nikolaev D., Zolotov D., Schelokov I. Enhanced Tomographic Sensing Multimodality with a Crystal Analyzer//Sensors, 2020, Vol. 20, No. 23, P. 6970.
2. Buzmakov A.V., Dunaev A.G., Krivonosov Y.S., Zolotov D.A., Dyachkova I.G., Krotova L.I., Volkov V.V., Bodey A.J., Asadchikov V.E., Popov V.K. Wide-Ranging Multitool Study of Structure and Porosity of PLGA Scaffolds for Tissue Engineering//Polymers, 2021, Vol. 13, No. 7, P. 1021.
3. Buzmakov A., Krivonosov Y., Grigoriev M., Mogilevskiy E., Chukalina M., Nikolaev D., Asadchikov V. Iterative Algorithm for 4D Tomography Reconstruction Using a Single Projection per Time Step//IEEE Access, 2022, Vol. 10, P. 46963-46974.
4. Zolotov D.A., Asadchikov V.E., Buzmakov A.V., Volkov V.V., D'yachkova I.G., Konarev P.V., Grigorev V.A., Suvorov E.V. New approaches to three-dimensional reconstruction of dislocations in silicon by x-ray topo-tomography//Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 2022.
5. Faenov A.Y., Pikuz T.A., Matsuoka T., Kodama R., Pikuz S.A., Makarov S., Mabey P., Albertazzi B., Michel T., Rigon G., Koenig M., Buzmakov A., Casner A., Ozaki N., Katagiri K., Takahashi K., Tanaka K.A., Miyaniishi K., Inubushi Y., Togashi T. Advanced high resolution x-ray diagnostic for HEDP experiments//Scientific Reports, 2018, Vol. 8, No. 1, P. 16407.
6. Zolotov D., Buzmakov A., Grigoriev M., Schelokov I. Dual-energy crystal-analyzer scheme for spectral tomography//Journal of Applied Crystallography, 2020, Vol. 53, No. 3, P. 781-788.
7. Bukreeva I., Asadchikov V., Buzmakov A., Chukalina M., Ingacheva A., Korolev N.A., Bravin A., Mittone A., Biella G.E.M., Sierra A., Brun F., Massimi L., Fratini M., Cedola A. High resolution 3D visualization of the spinal cord in a post-mortem murine model//Biomedical Optics Express, 2020, Vol. 11, No. 4, P. 2235-2253.
8. Makarov S., Pikuz S., Ryazantsev S., Pikuz T., Buzmakov A., Rose M., Lazarev S., Senkbeil T., Gundlach A. von, Stuhr S., Rumancev C., Dzhigaev D., Skopintsev P., Zaluzhnyy I., Viefhaus J., Rosenhahn A., Kodama R., Vartanyants I.A. Soft X-ray diffraction patterns measured by a LiF detector with sub-micrometre resolution and an ultimate dynamic range//Journal of Synchrotron Radiation, 2020, Vol. 27, P. 625-632.
9. Bukreeva I., Junemann O., Cedola A., Brun F., Longo E., Tromba G., Wilde F., Chukalina M.V., Krivonosov Y.S., Dyachkova I.G., Buzmakov A.V., Zolotov D.A., Palermo F., Gigli G., Otlyga D.A., Saveliev S.V., Fratini M., Asadchikov V.E. Micromorphology of pineal gland calcification in age-related neurodegenerative diseases//Medical Physics, 2022, P. mp.16080.
10. Bulatov K., Ingacheva A., Gilmanov M., Kutukova K., Buzmakov A., Chukalina M., Zschech E., Arlazarov V.V. Towards monitored tomographic reconstruction: algorithm-dependence and convergence//Computer Optics, 2022.
11. Meshkov A., Khafizov A., Buzmakov A., Bukreeva I., Junemann O., Fratini M., Cedola A., Chukalina M., Yamaev A., Gigli G., Wilde F., Longo E., Asadchikov V., Saveliev S., Nikolaev D. Deep Learning-Based Segmentation of Post-Mortem Human's Olfactory Bulb Structures in X-ray Phase-Contrast Tomography//Tomography, 2022, Vol. 8, No. 4, P. 1854-1868.