

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов Российской
академии наук (ИПТМ РАН)
д.ф.-м.н, член-корр. РАН
Рощупкин Д.В.



«04» декабря 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН) 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».

Представленная диссертация посвящена разработке теории оптических преобразований при наклонном освещении объектов и развитию методов моделирования изображающих оптических систем в такой геометрии.

В настоящее время существует потребность исследования поверхностей различных материалов и процессов в наноразмерной шкале измерений. В том числе абляции, фазовых переходов, процессов самоорганизации, физико-химических превращений и др. Чтобы наблюдать их, нужна длина волны, которая сможет обеспечить соответствующее пространственное разрешение. С одной стороны, чем меньше длина волны, тем выше разрешение можно получить. С другой стороны, для некоторых задач важную роль играет глубина проникновения излучения в материал. Наконец, с уменьшением длины волны источники и оптика становятся менее доступны и дороже. С учётом указанных факторов во многих задачах нанопластики и нанотехнологий наблюдения ведутся с помощью излучения с энергией фотонов 0,1-10 кэВ. Поскольку исследуются поверхности и плёнки на них, то изображения естественно получать с помощью микроскопа, использующего отражение от поверхности образца. Однако, при таких длинах волн существенная доля излучения отражается лишь при малых углах скольжения $\leq 10^\circ$. Таким образом, появляется идея создания рентгеновского микроскопа, работающего на отражении при скольжащих углах (grazing incidence reflection-type X-ray microscope). В данной работе рассматривается одна из возможных оптических схем такого микроскопа.

Другой круг задач, приводящих к изображениям наклонных объектов, связан с использованием рентгеновского излучения для печати с уменьшением – одной из важных

технологий микроэлектроники и микролитографии. Во многих случаях в них используется получение уменьшенных изображений предварительно созданной маски на слое резиста, покрывающем функциональный материал. Постоянное стремление производить элементы всё меньших размеров актуализирует применение в промышленной электронике все более коротких длин волн, которые сейчас достигли 13 нм, а обсуждается длина волны 6,7 нм. Из-за большого поглощения маски, работающие на просвет, в этом диапазоне проблематичны. В то же время известно, что изображения с хорошим разрешением получают с помощью оптики нормального падения, в которой образцы освещаются под прямым углом к поверхности. Это приводит к использованию отражающих масок с многослойным покрытием. Однако, и в этом случае коэффициент отражения при нормальном падении резко падает при уменьшении длины волны и возникает вопрос о скользящем падении.

Это тем более важно, что в настоящее время одним из крайне актуальных диапазонов рентгеновского излучения является диапазон экстремального вакуумного ультрафиолета (ЭУФ) и мягкого рентгена (МР) в связи с ключевой государственной задачей создания отечественной микроэлектронной промышленности. Для решения этой задачи требуется как разработка новых рентгенооптических элементов под ЭУФ диапазон, так и повышение качества существующих рентгенооптических элементов, что позволит достичь пространственного разрешения в несколько нанометров при производстве чипов.

Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, актуальна и практически значима.

По своей структуре диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, определены ее цели и задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена практическая значимость и новизна работы, указан вклад автора.

Первая глава отчасти является обзором литературы. В этой главе приведен вывод параболического волнового уравнения (ПВУ) из уравнения Гельмгольца, а также обсуждаются условия параксиального приближения, при которых справедливо ПВУ. В оригинальной части разобраны решения ПВУ при разных граничных условиях в двумерном и трехмерном случаях, в том числе представлено интегральное решение задачи. Здесь следует упомянуть, что в нашем институте в 90-х – начале 2000-х г.г. активно развивалась дифракционная оптика скользящего падения, что привело к разработке и созданию сканирующего микроскопа. Его схема является, своего рода инвертированной по отношению к оптической схеме микроскопа, представленной в диссертации – объект расположен по нормали к оптической оси, а объектив микроскопа изготовлен в геометрии скользящего падения. При этом математические преобразования, лежащие в основе функционирования данного микроскопа полностью тождественны (формулы (64) и (73)) полученным в диссертационной работе на что в диссертации имеется соответствующая ссылка ([14]). Однако, необходимо отметить, что, во-первых, мы получили математические преобразования, исходя из совершенно других принципов, а во-вторых, никогда не рассматривали возможность получения изображений, в связи с

большими aberrациями объектива скользящего падения – он рассматривался только для формирования микрозонда.

Особо хочется отметить предложенный, на основе полученных математических преобразований, алгоритм расчета интеграла Френеля с помощью быстрого преобразования Фурье, который позволяет проводить моделирование и анализ изображений различных объектов в отражательной геометрии, а также существенно сократить объем вычислений.

В конце главы приводится краткий обзор литературы по рентгеновской оптике.

Во второй главе методами волновой оптики находится плоскость, на которой изображение будет наиболее подобным объекту, и выводится распределение интенсивности на этой плоскости в зависимости от распределения интенсивности на объекте. В начале главы рассматривается положение так называемой оптически сопряженной плоскости, т.е. плоскости, сопряженной к плоскости объекта относительно линзы. Затем в случае нормально расположенного объекта приводится известный вывод формулы плоской линзы с помощью параболического волнового уравнения, действие линзы в данном подходе моделируется определенным фазовым экраном. После чего в том же приближении разобран случай наклонно расположенного объекта, что является новым. В результате анализа делается вывод о том, что плоскостью, на которой изображение будет наиболее подобным объекту, является оптически сопряженная плоскость и получена формула, связывающая распределение поля на этой плоскости и распределение поля на объекте. Глава завершается рассмотрением предельных случаев для данной формулы.

В третьей главе предложен новый метод рентгеновской литографии с отражающей маской, а также приведены результаты численного моделирования. В расчетах автор ограничился применением когерентных источников с длиной волны ~ 13 нм.

В четвертой главе представлена оптическая схема рентгеновского микроскопа, работающего на отражении от объекта под скользящими углами. С помощью численного моделирования выполнены оценки пространственного разрешения и поля зрения, а также проведено сравнение данной схемы с оптической схемой из имеющихся в литературе экспериментов.

В заключении приведены основные результаты работы.

Научная новизна в данной работе заключается в том, что с помощью методов волновой оптики получено оптическое преобразование, определяющее ориентацию, амплитуду и фазу изображений наклонных объектов. В параксиальном приближении было показано, что плоскость, на которой изображение будет наиболее подобным объекту находится на оптически сопряженной наклонной плоскости, и получена формула, связывающая амплитуду и фазу полей на объекте и детекторе.

С помощью развитого в работе теоретического подхода были рассмотрены оптические схемы для литографии и микроскопии в рентгеновском диапазоне длин волн. Численное моделирование проводилось на длине волны 13.9 нм.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке схем печати и получения изображений в диапазоне от нескольких сотен до нескольких тысяч электронвольт, где применяется наклонное освещение объектов и масок.

Ярко выраженный теоретический характер работы значительно упрощает ее критический анализ, поскольку большинство положений подтверждается математическими доказательствами. Тем не менее, по работе можно сделать следующие замечания, которые, хотя и носят «косметический» вид опечаток, призывают автора к большей дисциплине при написании ответственных научных текстов:

- 1) Постановка задачи (31), (35) (56) и далее: желательно указывать, что решение получается в верхнем полупространстве, т.е. в отражательной геометрии.
- 2) Формула (32): явная опечатка, преобразование Фурье осуществляется по другим координатам, нежели указано в тексте.
- 3) Формула (40): опечатка – (10) вместо (40).
- 4) Выражение - (шаг дискретизации должен быть таким, чтобы «более-менее угадывалось» положение между отсчетами) – перед формулой (84), может быть и верно, но требует дополнительной аргументации. Вообще говоря, шаг дискретизации при расчете интегралов Френелевского типа должен быть таким, чтобы хотя бы одна точка лежала в последней зоне Френеля, размещенной в апертуре пучка зонной пластинки Френеля. Иначе будет утрачена фаза излучения из данной точки поверхности.
- 5) другие опечатки не содержат ничего существенного.

Отмеченные недостатки не затрагивают основных выводов диссертационной работы и поэтому не являются принципиальными для ее высокой положительной оценки. В целом, диссертационная работа представляет собой законченное оригинальное научное исследование и выполнена на высоком профессиональном уровне. Особо хочется выделить последовательность при выполнении диссертационной работы и ее математическую красоту, которая в наше время является редкостью. Кроме этого, решение задачи в волновом подходе является крайне востребованным, с точки зрения развития современных источников синхротронного излучения 4-го поколения, т.к. частичная когерентность излучения делает неприменимым приближение геометрической оптики.

Полученные в диссертации результаты, безусловно, представляют большой интерес как для исследователей в области рентгеновской оптики, так и для научных групп, занимающихся разработкой оптики и инструментария для высококогерентных источников рентгеновского излучения (источники СИ СКИФ, СИЛА, проект МИЭТ). Материалы диссертации опубликованы, апробированы на семинарах и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

На основании изложенного можно заключить, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, 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».

Диссертационная работа Бусарова А. С. "Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов" заслушана и обсуждена на заседании

семинара «Физический» Института Проблем Технологии Микроэлектроники и Особо чистых материалов РАН 25 октября 2023 года.

Отзыв составил заместитель директора по научной работе ИПТМ РАН, к.ф.-м.н., Иржак Дмитрий Вадимович; e-mail: irzhak@iptm.ru



/Иржак Д.В./

Отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого совета Института Проблем Технологии Микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, протокол № 16 от 04 декабря 2023 года.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН).

Почтовый адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 6.

Тел.: +7 (49652) 4-40-60

E-mail: general@iptm.ru

Сайт: <http://www.iptm.ru>

Список основных работ сотрудников ведущей организации ФГБУ «ИПТМ РАН» по тематике диссертации А.С. Бусарова "Методы волновой оптики для получения рентгеновских изображений наклонных объектов " в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Zverev D., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A., X-ray phase-sensitive imaging using a bilens interferometer based on refractive optics, *Optics Express*, v.28,(15), p.21856, 2020
2. Sorokovikov Mikhail, Zverev Dmitrii, Yunkin Vyacheslav, Kuznetsov Sergey, Snigireva Irina, Snigirev Anatoly A., High-resolution phase-sensitive x-ray imaging technique based on the bilens system in an advanced optical layout, *X-Ray Nanoimaging: Instruments and Methods V*, 2021
3. Zverev Dmitry, Snigireva Irina, Sorokovikov Mikhail, Yunkin Vecheslav, Kuznetsov Serguei, Snigirev Anatoly, Coherent X-ray beam expander by multilens interferometer, *Optics Express*, 2021
4. Sorokovikov Mikhail, Zverev Dmitrii, Yunkin Vyacheslav, Snigirev Anatoly, Metrology of a coherent x-ray beam expander for advanced synchrotron sources, *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XVII*, 2022
5. Barannikov A., Zverev D., Sorokovikov M., Korobnikov M., Yunkin V., Dudchik Y., Snigireva I., Snigirev A., Deformation field mapping of the X-ray silicon Fresnel Zone Plate, *Procedia Structural Integrity*, v.40, p.40-45, 2022
6. Zverev D. A., Yunkin V. A., Kuznetsov S. M., Barannikov A. A., Sorokovikov M. N., Voevodina M. A., Snigirev A. A., Determination of the Collimation Degree of a Coherent X-Ray Beam Using a Planar Multilens Interferometer, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, v.17,(5), p.995-1000, 2023