

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Дмитрия Алексеевича ЗВЕРЕВА "Формирователи жёсткого рентгеновского пучка на основе элементов преломляющей оптики для когерентных источников излучения", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Для управления пространственным и спектральным распределением рентгеновских пучков и импульсов широко используются такие элементы рентгеновской оптики как прямые и изогнутые кристаллы, многослойные периодические и аperiodические структуры, зеркала скользящего падения на основе явления полного внешнего отражения, дифракционные решетки, зонные пластинки Френеля. В конце 90-х годов после пионерских работ А.А. Снигирёва с сотрудниками возникло новое перспективное направление – рентгеновская преломляющая оптика, позволившая добиться существенного прогресса в фокусировке излучения и создании элементов изображающей оптики.

Появление новых высоко когерентных источников синхротронного излучения (СИ) и рентгеновских лазеров на свободных электронах с предельно малым эмиттансом и высокой яркостью привело к необходимости создания оптики нового поколения, которая должна в полной мере без потери и искажения уникальных свойств источников формировать заданный когерентный фронт рентгеновских пучков и проводить с ним необходимые оптические преобразования в целях получения микроскопических фазо-контрастных изображений исследуемых объектов с высоким пространственным разрешением, создания рентгеновских интерферометров нового типа, прецизионной диагностики параметров источников излучения и т.п.

В этой связи тема диссертационной работы Д.А. Зверева, которая как раз и посвящена разработке методов и устройств для формирования и управления волновым фронтом пучков жесткого рентгеновского излучения с использованием элементов преломляющей оптики и их применением на источниках синхротронного излучения для практической реализации когерентных методов визуализации и диагностики, является актуальной и своевременной.

Структура диссертации классическая. Она состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 118-ти страницах, включает 41 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 109 наименований.

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цели работы и научные задачи, научная новизна и практическая ценность, научные положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора, а также приведен список 9-ти печатных работ в реферируемых зарубежных журналах, включённых в перечень ВАК с

импакт-фактором от 0.4 до 3.67, перечень 21 российских и международных научных конференций, семинаров и научных школ, на которых апробировалась работа, а также список 5-ти патентов на полезную модель, полученных по материалам работы.

В первой главе, объемом 26 стр., которая называется “Теоретические основы”, содержится достаточно полный обзор современного состояния исследований в области рентгеновской оптики, включая краткое описание характеристик существующих лабораторных и синхротронных источников рентгеновского излучения и рентгеновских лазеров на свободных электронах, особенностей взаимодействия рентгеновского излучения с веществом и изложение теоретических подходов для описания процессов распространения рентгеновского излучения, прошедшего через элементы рентгеновской преломляющей оптики, на основе вычисления интегралов Френеля-Кирхгофа. Особое внимание уделено составным преломляющим рентгеновским линзам и изображающим оптическим системам на их основе, а также современным методам рентгеновской визуализации, таким как микроскопия, томография, фазо-контрастная интроскопия, когерентная дифракция, осевая рентгеновская голография и способам диагностики характеристик источников синхротронного излучения.

Во второй главе, с названием “Формирование конического волнового фронта рентгеновского пучка” и объемом 26 стр., вначале проведено теоретическое описание пространственного распределения поля, сформированного параболическим аксиконом, ранее известном в оптике видимого диапазона. Этот новый для рентгеновской оптики элемент, впервые изготовленный и исследованный автором диссертации, представляет собой двояковогнутую линзу со специальным профилем, состоящим из двух смещенных относительно оси параболических профилей. Он интересен тем, что при падении на него когерентного излучения в ближней зоне вдоль оси формируется узкий сходящийся микропучок (так называемый пучок Бесселя), а в дальней зоне образуется излучение с расходящимся коническим волновым фронтом, которое фокусируется в кольцо с линейно возрастающими диаметром и шириной.

Далее в главе излагаются результаты по изготовлению первых рентгеновских параболических аксиконов, полученных путем одновременного сжатия поликристаллической алюминиевой заготовки с обеих сторон стальными пуансонами с требуемой выпуклой формой, и подробно исследованы их оптические свойства на исследовательской станции ID13В источника СИ ESRF (Гренобль, Франция) с энергией от 10 до 15 кэВ. Экспериментально полученные изображения пучка Бесселя и кольцевого конического пучка хорошо согласуются с теоретическими расчётами. Таким образом, впервые были продемонстрированы возможности применения новых

оптических элементов - параболических аксиконов, для формирования сложного волнового фронта рентгеновского излучения. Следует подчеркнуть, что поперечный размер центральной области пучка Бесселя примерно в 1.6 раза меньше диаметра фокуса, образованного рентгеновской параболической линзой с аналогичной числовой апертурой. По этой причине параболический аксикон является очень перспективным оптическим элементом с протяженной глубиной фокуса, хотя интенсивность пучка Бесселя и несколько ниже интенсивности в фокусе обычной параболической линзы.

В следующих разделах не только обсуждаются, но и ярко демонстрируются экспериментальные возможности использования аксиконов для диагностики рентгеновского источника, для осесимметричной юстировки оптических систем, для получения сфокусированного кольцевого пучка с переменным диаметром в системе из одного аксикона и переменного числа параболических преломляющих линз. Показано, что, в согласии с теоретическими расчетами, диаметр формируемого кольцевого пучка уменьшается с увеличением числа параболических линз в составе этой оптической системы. С помощью численного моделирования показано, что при использовании системы из преломляющего аксикона и эллиптического капилляра возможна субмикронная фокусировка излучения. В целом ряде экспериментов с различными расположениями и размерами щелей продемонстрирована высокая чувствительность схемы из аксикона и одной или нескольких параболических линз к степени осевой симметрии всей оптической системы. Это следует из анализа данных по искажениям кольцевой формы пучка и угловой азимутальной зависимости распределения интенсивности в кольце.

Наиболее значимые и интересные результаты приведены в заключительной части 2-й главы, в которой впервые предложен и успешно апробирован метод фазо-контрастной рентгеновской микроскопии на основе параболического преломляющего аксикона для визуализации слабо-поглощающих объектов, в том числе и медико-биологических, для которых абсорбционный контраст ничтожно мал. Использование аксикона как фазосдвигающего устройства с плавным сдвигом фазы волны, рассеянной исследуемым образцом, по отношению к опорному пучку, является более простым и надежным методом по сравнению с известной оптической схемой рентгеновской фазо-контрастной микроскопии Цернике. В диссертации успешно реализована соответствующая оптическая схема, состоящая из конденсорной линзы из 26-ти бериллиевых параболических линз, объективной линзы из 30-ти бериллиевых линз и одного алюминиевого аксикона. Фазовым образцом служила тонкая кремниевая зонная пластинка Френеля с коэффициентом пропускания 99% при энергии рентгеновских фотонов 12 кэВ. Размеры фокусов и прочие расстояния были подобраны таким

образом, что изображающая оптическая система имела 8-ми кратное увеличение. Экспериментально показано 4-х кратное увеличение контраста (до 40%) фазо-контрастного изображения по сравнению с традиционным методом, в котором аксикон в объективной линзе заменён на параболическую фокусирующую линзу. Пространственное разрешение системы составляет примерно 2.5 мкм.

В третьей главе “Формирование периодической пространственной структуры пучка при помощи элементов преломляющей оптики”, объёмом 43 стр., вначале проведено теоретическое описание оптических свойств двухлинзового и многолинзового интерферометра, а затем реализованы соответствующие экспериментальные исследования по регистрации периодического распределения интенсивности поля в пространстве (так называемого распределения Тальбота). Физическая причина образования периодического распределения поля в пространстве обусловлена интерференцией волн, испущенных из практически точечных взаимно-когерентных источников, которыми являются фокусы индивидуальных составных линз. Эти вторичные источники периодически расположены в плоскости с периодом, равным расстоянию между осями линз, а расстояние от интерферометра до этой плоскости равно фокусному расстоянию идентичных составных преломляющих линз. Планарные двух- и многолинзовые интерферометры с разными количествами отдельных параболических линз и разными фокусными расстояниями были изготовлены на поверхности кремниевых пластин методом электронно-лучевой литографии и глубокого анизотропного плазменного травления, что позволило охватить диапазон энергий от 10-ти до 50-ти кэВ. Для двухлинзового интерферометра, рассчитанного на энергию 12 кэВ, число отдельных линз менялось от 6-ти до 162-х с фокусными расстояниями от 154-х до 5.7 мм. Экспериментальные результаты тестирования как двухлинзового, так и 100-линзового интерферометра полностью согласуются с теоретическими оценками. Полная апертура 100-линзового интерферометра составила 1 мм, что для источников СИ 3-го поколения примерно равна поперечному размеру пучка на расстоянии 100 м от источника. Из анализа измеренной ширины полосы, равной 1.4 мкм, и её сопоставления с расчетным значением 0.4 мкм и пространственным разрешением детектора 1.3 мкм удалось оценить эффективный размер источника (≈ 50 мкм).

Наиболее интересные и важные результаты приведены в разделе, посвящённом методу фазо-чувствительной визуализации на основе двухлинзового интерферометра. В основе метода восстановления фазового профиля образца лежит анализ сдвига и искажения интерференционных полос при помещении образца перед одной из линз

интерферометра и дальнейшем сканировании этого образца в перпендикулярном направлении по отношению к оси линз. Возможности и высокая чувствительность метода были убедительно продемонстрированы на примере таких объектов как углеродное волокно диаметром 9 мкм, вольфрамовое волокно диаметром 4 мкм и борное волокно, представляющее собой коаксиальную структуру из борной оболочки диаметром 100 мкм и центрального стержня из вольфрама диаметром 15 мкм.

В заключительной части этой главы показано, что многолинзовый интерферометр может эффективно служить как расширитель рентгеновского пучка, а также предложен новый оригинальный метод интерферометрического исследования тонких плёнок с толщиной несколько нанометров при их облучении сходящимся сфокусированным линзой пучком без использования традиционного углового сканирования.

В целом диссертация Д.А. Зверева производит самое благоприятное впечатление. В первую очередь благодаря своей целостности, удобной рубрикации глав на параграфы и их подразделы, четкости изложения полученных результатов, тщательности описания деталей эксперимента, т.е. размеров, расстояний, радиусов, пространственного разрешения детекторов и т.п., а также приведению большого числа хорошо подобранных графических иллюстраций.

По диссертации можно сделать следующие замечания, часть из которых носит характер пожеланий:

1. Такое название 1-й главы как “Теоретические основы”, считаю не совсем удачным, поскольку глава представляет собой в основном литературный обзор имеющихся экспериментальных методик в области рентгеновской оптики.
2. На многих приведенных рисунках, особенно в первой главе, отсутствуют ссылки на литературные источники, из которых взяты те или иные иллюстрации.
3. На стр. 28 в разделе, посвященном методу расчёта интенсивности излучения, прошедшего через объект, написано: “Следует отметить, что конечный размер источника s_0 можно учесть, используя сумму полученных распределений интенсивности, образованных точечными источниками, размещенными на излучающей поверхности”. В общем случае это достаточно спорное утверждение, справедливое лишь при априорном предположении, что поле на выходном окне синхротрона является полностью некогерентным, т.е. длина поперечной когерентности равна нулю, что не согласуется с малой угловой расходимостью СИ. Также не совсем понятно, что автор называет “излучающей поверхностью”. Это поверхность выходного окна канала СИ или поверхность сгустка излучающих электронов в ондуляторе?
4. При анализе распределения интенсивности поля, сформированного аксиконом и

полученного приближенно методом стационарной фазы (стр. 42 и 43, соотношения (2.5)-(2.7)), желательно более подробно обсудить бросающуюся в глаза “особую” точку на расстоянии, равном фокусному расстоянию.

5. Не совсем понятно, что такое “наклон электронного пучка в накопительном кольце” (2-ая строка на стр. 51), в какую сторону имеется этот наклон, можно ли его как-то регулировать или исключать?

6. На стр. 72 написано, что измеренная высота шероховатостей поверхности планарных линз составляла 20 нм, однако не указано как это было измерено.

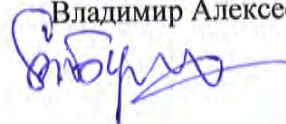
Диссертация изложена четко, грамотно и очень аккуратно. Многочисленные тщательно подобранные цветные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные полученные автором результаты. Автор умеет давать простую и наглядную физическую интерпретацию полученным результатам. Все четыре защищаемых положений сформулированы четко и правильно. Формулировка основных результатов в конце каждой главы хорошо помогает восприятию текста. Автореферат дает достаточно полное представление о материале диссертации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на представительных совещаниях и конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Считаю, что по объёму полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Дмитрий Алексеевич Зверев, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Профессор кафедры физики твердого тела
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук

119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,
МГУ, физический факультет
тел. 8(495) 939-12-26, e-mail: vabushuev@yandex.ru
31 января 2021 г.

Владимир Алексеевич Бушуев



Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю
декан физического факультета МГУ,
профессор