

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Зверева Дмитрия Алексеевича**

«Формирователи жесткого 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.

Диссертационная работа Зверева Д.А. посвящена развитию методов и устройств для формирования рентгеновских пучков и управления формой волновых фронтов с использованием преломляющей рентгеновской оптики, а так же демонстрация их возможностей по реализации когерентных методов рентгеновских исследований на пучках синхротронного излучения.

Актуальность диссертационной работы обусловлена следующим. В последнее время наблюдается очень быстрое расширение области применения синхротронного излучения в научных и технологических целях, что автоматически предполагает развитие рентгеновской оптики и новых рентгеновских методов изучения вещества. При этом параллельно совершенствуются источники синхротронного излучения, повышается их яркость и средняя мощность, уменьшаются размеры пучков до единиц-долей миллиметра, а пучки имеют хорошие когерентные свойства. И еще одна тенденция развития современных синхротронов – это продвижение в область высоких, сотни кэВ, энергий фотонов. Все это открывает исследователям новые перспективные и, одновременно, предъявляет специфические требования к рентгенооптическим элементам и системам. В частности, одним из относительно новых требованиям к оптическим элементам является сохранение когерентных свойств пучков после взаимодействия с ними.

И вот в этих новых условиях преломляющая оптика не только находит свои ниши в синхротронных исследованиях, но и активно и успешно отвоевывает их у традиционной зеркальной оптики. И в настоящее время практически все относительно «жесткие» каналы синхротронов 3 и 4-го поколения оснащены этими рентгенооптическими элементами.

Научной новизной диссертационной работы Зверева Дмитрия Алексеевича является то, что он рассматривает не только традиционные задачи фокусировки и коллимации пучков синхротронного излучения, но и формирование волновых

фронтов более сложной формы, в частности Бесселева рентгеновского пучка. В работе предложены и реализованы новые методы фазоконтрастной микроскопии, и интерферометрии с использованием разработанных автором преломляющих элементов.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что все разработанные автором методы и рентгенооптические элементы прошли экспериментальную апробацию и подтверждена их эффективность при работе на синхротронах 3/3+ поколений. Без сомнения, в дальнейшем результаты диссертационной работы найдут применения, в частности, разработанная методика определения размера источника рентгеновского излучения. Следует так же отметить разработанную диссертантом методику измерений толщин пленок на выпуклых поверхностях. Эта методика решает целый класс проблем технологии тонких пленок и зеркальной рентгеновской оптики, в частности. Высокий практический потенциал результатов данной диссертации подтверждается, в том числе и пятью патентами.

Диссертационная работа Зверева Д.А. состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников из 109 наименований

Во введении отмечены актуальность исследований, научная новизна работы, практическая значимость, достоверность полученных результатов, дана характеристика личного вклада автора в полученные результаты, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций автора по диссертации, состоящий из девяти работ, а так же пяти патентов. Приводятся данные о конференциях и симпозиумах, всего 17, где результаты диссертации прошли апробацию.

В первой главе дается обзор современной научной литературы по теме диссертационной работы. Хочу отметить, что в отличие от традиционного российского подхода, где в обзоре упор делается на работы близкие к теме диссертационной работы, обзор Зверева Д.А. ближе к западным аналогам, и значительная часть текста посвящена общим вопросам генерации и взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Приведенный обзор указывает на высокий уровень эрудиции автора и достаточную глубину понимания предмета, что характеризует его как уже зрелого молодого ученого. На основе результатов обзора формулируются недостатки традиционных методов

когерентной рентгеновской оптики. Совершенствование некоторых из них и стало предметом диссертационной работы.

Вторая глава диссертации посвящена формированию конических пучков с помощью преломляющих элементов и, в частности, использованию нового рентгенооптического преломляющего элемента – параболического аксикона. В главе рассмотрены, как теоретические основы работы этого элемента, так и практические вопросы изготовления и характеристики преломляющего профиля, а так же изучены его рентгенооптические характеристики на синхротронах. Приводится яркая иллюстрация применения этого элемента в составе рентгенооптической схемы для получения конических (кольцевых) источников рентгеновского излучения. Обсуждаются возможные применения этой оптики. Одним из интересных применений, основанных на обнаруженном свойстве аксиконов – сильной чувствительности формы волнового фронта к децентровке всей оптической системы, является использование этого элемента для юстировки многоэлементных рентгенооптических систем.

Другим важным результатом, описанным в главе два, является предложенная, реализованная на практике и изученная схема фазоконтрастной микроскопии на основе традиционных преломляющих линз и аксикона. Показано преимущество этой схемы по сравнению с традиционной микроскопией в части контраста изображения.

В третьей главе изучаются методы формирования периодических пространственных структур полей рентгеновского излучения с помощью преломляющей рентгеновской оптики. Анализируются различные интерферометрические схемы, проводятся соответствующие эксперименты. Приводятся различные иллюстрации интерференционных картин, полученных экспериментально. Предлагается совмещение методов интерферометрии и микроскопии и приводится красивый пример по изучению структуры образцов волокон. Показано, что метод хорошо работает, как при наличии сильного поглощения, так и для чисто «рефракционных» образцов.

Одним из интересных результатов стала интерферометрическая методика по измерению толщин пленок на выпуклых поверхностях. Эта методика по ряду

причин может считаться уникальной, поскольку обеспечивает высокий уровень локализации измерений на выпуклых поверхностях подложки.

Характеризуя диссертационную работу Зверева Д.А. в целом, можно сказать следующее. Во-первых, все основные научные результаты являются новыми, яркими и соответствуют мировому уровню. Во-вторых, соискатель демонстрирует высокую и разностороннюю научную квалификацию, что проявляется, в том числе, в фундаментальном подходе к решению задач. В начале, после формулировки идеи, автор строит математическую модель объекта, затем численно, где можно аналитически, оптимизирует параметры схемы, затем проводит эксперимент и обязательно – сравнение с количественными оценками результатов эксперимента и теории. В-третьих, диссертация написана хорошим языком и содержит единичные опечатки и несогласованные предложения.

Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений и подтверждена пятью патентами на изобретения, а так же девятью публикациями в высокорейтинговых, в том числе первого квартиля, тематических научных журналах, входящих в перечень ВАК. Изложенные в диссертационной работе научные результаты были доложены на почти двух десятках международных конференциях, тем самым прошли международную научную экспертизу.

Автореферат написан хорошо, отражает все основные результаты диссертационной работы, защищаемые положения, актуальность работы, научную новизну и практическую значимость, цель работы, достоверность и вклад автора.

В то же время, есть несколько замечаний по диссертации:

1. Ссылка [24] в списке литературы приведена не корректно, так же имеется опечатка «... dilraction of X-rays.» вместо «.. diffraction of X-rays.»; ссылка [67] ошибка в номере журнала, правильно «Science 14»; ссылка [76], правильно «Science 121».
2. В формуле 1 приведено необычное представление показателя преломления, выраженное через атомные факторы рассеяния. В тексте дается оговорка, что речь идет о дисперсионной добавке к фактору рассеяния, но это, на мой взгляд, затрудняет понимание. Более того, я не встречал в базах данных атомных

факторов рассеяния в виде отрицательной добавки к Z . По определению атомный фактор рассеяния, или амплитуда атомного рассеяния, — это функция, зависящая от угла рассеяния и определяемая отношением суммарной амплитуды волны, рассеянной всеми электронами одного атома, к амплитуде волны, рассеянной одним электроном. Т.е. эквивалентное число рассеивающих электронов в одном атоме. Общее число электронов Z здесь и далее не уместно. Достаточно из формул убрать Z , а в (1) добавить мнимую « i », а фактор атомного рассеяния привести в его обычном (физическом) смысле, и все последующие формулы примут привычный вид.

3. В тексте не определена переменная μ , содержащаяся в формуле 1.12.

4. Подпись к рис. 2.11 использует обозначения фрагментов рисунка смешанно, кириллицей и латиницей, в то время как на рисунке используется только кириллица. Аналогично рис. 3.6. На рис. 3.16 буквенная идентификация отсутствует.

5. Параграф 2.2.3, посвящен очень интересному предложению диссертанта по увеличению эффективности и разрешающей способности капиллярной оптики за счет использования Бесселевого пучка, сформированного параболическим аксиконом. Приводится результат моделирования. Говорится о предварительном эксперименте. Однако в тексте нет никаких данных, ни экспериментальных, ни расчетных, которые бы продемонстрировали эффект в виде повышения интенсивности выходного пучка во столько-то раз, или уменьшение размера фокуса во столько-то раз. Хотелось бы услышать комментарий диссертанта по этому вопросу.

6. Стр. 82, конец 2-го абзаца сверху. Утверждение автора «...дифракционная оптика и фокусирующие зеркала... не могут работать при высоких энергиях (более 20 кэВ)...» не корректно, ни по отношению к дифракционной оптике, например Брэгг-Френелевская линза, ни к зеркалам скользящего падения, включая многослойные.

7. Требуется пояснение, почему в эксперименте, результаты которого приведены на рис. 3.15, и который, как я понял, был сделан без использования пористого бериллия, модуляция интенсивности существенно меньше, чем во втором случае, рис. 3.16.

Однако отмеченные недостатки ни сколько не умаляют научную и практическую ценность работы, высочайшую квалификацию соискателя, соответственно ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация представляет собой добротную, логически завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Зверева Д.А. «Формирователи жесткого рентгеновского пучка на основе элементов преломляющей оптики для когерентных источников излучения» в полной мере отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.13 с изменениями от 21.04.2016 г. №335), а ее автор, Зверев Дмитрий Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
заведующий отделом, ИФМ РАН


Чхало Н.И.

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603087, Нижегородская область, Кстовский район, деревня Афонино, Академическая улица, 7

Тел.: (8) 831 417 9475

E-mail: chkhalo@ipmras.ru

Подпись Н.И. Чхало заверяю

Учёный секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.

Garonova Daria dmg@ipmras.ru





Д.М. Гапонова

01 февраля 2021