

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 520.009.01 НА БАЗЕ
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ» (ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ – ПРАВИТЕЛЬСТВО РФ) ПО
ДИССЕРТАЦИИ ЗВЕРЕВА ДМИТРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА «ФОРМИРОВАТЕЛИ
ЖЁСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ОПТИКИ ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ» НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.02.2021 г., № 2

О присуждении ЗВЕРЕВУ Дмитрию Алексеевичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация Зверева Д.А. на тему «Формирователи жёсткого рентгеновского пучка на основе элементов преломляющей оптики для когерентных источников излучения» по специальности «Приборы и методы экспериментальной физики» (01.04.01) принята к защите 19.11.2020 г. протокол № 10 диссертационным советом Д 520.009.01 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), 123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1 (утвержден Приказом Минобрнауки России № 1925-1018 от 08.09.2009 г. и переутверждён приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11.04.2012г.).

Соискатель Зверев Дмитрий Алексеевич 1988 года рождения.

Зверев Д.А. в 2012 г. окончил Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), г. Новосибирск, с присуждением степени магистра физики по направлению «физика», диплом о высшем образовании Н № 02944 от 06 июня 2012 года.

В период подготовки диссертации с сентября 2015 г. по июнь 2019 г. соискатель Зверев Д.А. обучался в очной аспирантуре ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (БФУ им. И. Канта), г. Калининград, по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния; работал в

должности инженера и младшего научного сотрудника в лаборатории рентгеновской оптики и физического материаловедения БФУ им. И. Канта. С 2019 г. и по настоящее время работает в должности научного сотрудника в Международном научно-исследовательском центре «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс» БФУ им. И. Канта.

Диплом об окончании аспирантуры №103924 3944451 и справка о сдаче кандидатских экзаменов № 3356 от 18.06.2020 г. выданы в БФУ им. И. Канта. Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальной дисциплине 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики № 072-2046 от 05.08.2020 г. выдана в НИЦ «Курчатовский институт». Получены следующие оценки: история и философия науки – отлично, иностранный язык (английский) – отлично, специальная дисциплина – отлично.

Научный руководитель: Снигирёв Анатолий Александрович, кандидат физико-математических наук, директор Международного научно-исследовательского центра (МНИЦ) «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс» Балтийского федерального университета им. И. Канта, г. Калининград.

Официальные оппоненты:

– Бушуев Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), г. Москва;

– Чхало Николай Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН — филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (ИФМ РАН), г. Нижний Новгород

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера» Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск, в своём положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником ИЯФ СО РАН, профессором, членом-

корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук Винокуровым Н.А. и утвержденном директором ИЯФ СО РАН, академиком РАН, доктором физико-математических наук Логачевым П.В., указала, что представленная диссертационная работа обладает высокой актуальностью, обусловленной стремительным развитием новых источников рентгеновского излучения с всё более высокой спектральной яркостью и степенью пространственной когерентности. Такое совершенствование источников позволило применять рентгеновское излучение для уникальных научных исследований в физике, химии, биологии и медицине. Предельные характеристики современных источников предъявляют качественно новые требования к рентгенооптическим устройствам, подразумевая необходимость в разработке методов и устройств формирования пучка, а также подходов их применения для рентгеновских исследований.

Из наиболее важных научных результатов и достижений, полученных в диссертационной работе, в отзыве ведущей организации отмечают:

1. Разработана конструкция рентгеновского параболического аксикона. Приведены аналитические решения для поля волны, прошедшей через аксикон. Обсуждаются особенности изготовления параболических аксиконов; представлены результаты и методы исследования их оптических свойств. Реализовано несколько применений рентгеновских параболических аксиконов.
2. Разработаны методы формирования пространственно-периодического распределения рентгеновского излучения. Приведены интересные результаты экспериментов с различными интерферометрическими схемами на основе многолинзовых устройств.

Ведущая организация также отмечает, что диссертация Зверева Д.А. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Основные представленные к защите результаты являются новыми и заслуживают общей положительной оценки работы. В работе представлены уникальные эксперименты по рентгеновской оптике, ясно описаны как теория вопроса, так и важные технические особенности проведённых экспериментов. Выдвигаемые соискателем теоретические и методологические положения, а также сформулированные в диссертации выводы и предложения, как результаты

исследования, являются новыми. Это в значительной степени связано с применением самых современных технических средств. Результаты, полученные соискателем, могут быть использованы для создания рентгенооптических элементов и методов на их основе для современных когерентных источников рентгеновского излучения. Такие работы особенно актуальны в связи с планами создания источников 4-го поколения в России.

Существенных замечаний к диссертационной работе нет. Сделанные замечания, имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности диссертации.

В конце отзыва ведущей организации резюмируется: «Диссертация Зверева Д.А. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи формирования жёсткого рентгеновского пучка на основе элементов преломляющей оптики для когерентных источников излучения, имеющей важное значение для развития рентгеновской оптики, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Дмитрий Алексеевич Зверев, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.»

Соискатель имеет 9 публикаций по теме диссертации в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus и в действующем Перечне ВАК:

1. Zverev, D., Barannikov, A., Snigireva, I., Snigirev, A. X-ray refractive parabolic axicon lens // Opt. Express. – 2017. – Vol. 25, No. 23. – P. 28469–28477.
2. 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 // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28, No. 15. – P. 21856–21868.
3. Lyatun, S., Zverev, D., Ershov, P., Lyatun, I., Konovalov, O., Snigireva, I., Snigirev, A. X-ray reflecto-interferometer based on compound refractive lenses // J. Synchrotron Radiat. – 2019. – Vol. 26 – P. 1572–1581.

4. Zverev D., Snigireva I., Snigirev A. Beam-shaping elements based on X-ray refractive optics: theory, modeling, and experiment // *Proceedings SPIE*. – 2020. – Vol. 11493 – P. 114930K.
5. Zverev D., Snigireva I., Snigirev A. Peculiarities in the interference pattern obtained by X-ray bilens interferometer // *Proceedings SPIE*. – 2020. – Vol. 11493 – P. 114930L.
6. Zverev, D., Snigireva, I., Snigirev, A. X-ray Phase Contrast Microscopy Based on Parabolic Refractive Axicon Lens. // *Microsc. Microanal.* – 2018. – Vol. 24, No. S2. – P. 296– 297.
7. Zverev, D., Snigireva, I., Kohn, V., Kuznetsov, S., Yunkin, V., Snigirev, A. X-ray Phase Contrast Imaging Technique Using Bilens Interferometer // *Microsc. Microanal.* – 2018. – Vol. 24, No. S2. – P. 162–163.
8. Zverev, D., Snigireva, I., Kuznetsov, S., Yunkin, V., Snigirev, A. X-ray phase-contrast imaging technique based on a bilens interferometer // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2299, No. 1. – P. 060013.
9. Zverev, D., Snigireva, I., Kuznetsov, S., Yunkin, V., Snigirev, A. Beam-shaping refractive optics for coherent X-ray sources // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2299, No. 1. – P. 060004.

По результатам настоящей работы было получено 5 патентов на полезную модель:

1. Зверев Д.А., Кузнецов С.М., Юнкин В.А., Снигирев А.А. Устройство для расширения коллимированного рентгеновского пучка // патент № 191608 Российская Федерация, МПК G21K 1/06 – БФУ им И. Канта. – № 2018147639; заявл. 29.12.2018; опубл. 14.08.2019.
2. Зверев Д.А., Баранников А.А., Климова Н.Б. Нарикович А.С., Хегай А.Г., Снигирев А.А. Рентгеновский фазово-контрастный микроскоп с объективом, содержащим аксикон // патент № 189629 Российская Федерация, МПК G01N 23/20 – БФУ им И. Канта. – № 2018147640; заявл. 29.12.2018; опубл. 29.05.2019.
3. Снигирев А.А., Снигирева И.И., Зверев Д.А., Климова Н.Б., Баранников А.А. Рентгеновский планарный аксикон // патент № 184726 Российская Федерация, МПК G21K 1/00 – БФУ им И. Канта. – № 2017145382; заявл. 22.12.2017; опубл. 07.11.2018.
4. Снигирев А.А., Снигирева И.И., Зверев Д.А., Климова Н.Б., Баранников А.А. Рентгеновский аксикон // патент № 184725 Российская Федерация, МПК

G21K 1/00 – БФУ им И. Канта. – № 2017145381; заявл. 22.12.2017; опубл. 07.11.2018.

5. Снигирев А.А., Снигирева И.И., Зверев Д.А., Климова Н.Б., Баранников А.А. Формирователь набора рентгеновских микропучков // патент № 181311 Российская Федерация, МПК G21K 1/02 – БФУ им И. Канта. – № 2017145380; заявл. 22.12.2017; опубл. 10.07.2018.

По своему содержанию все опубликованные работы посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям методов и устройств формирования рентгеновского пучка, а также экспериментальной реализации когерентных методов рентгеновских исследований на их основе.

На автореферат поступило 4 отзыва. Все отзывы положительные.

1. Отзыв из Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) РАН, г. Москва. Отзыв составил и.о. заведующего лабораторией рентгеновской оптики ФИАН, кандидат физико-математических наук Артюков И.А. Отзыв содержит 4 замечания по оформлению автореферата: «1) Логично было явно указать, какой именно метод численного моделирования описывается в первой главе диссертации. 2) При описании результатов теоретической работы во второй главе было бы интересным увидеть в автореферате несколько формул, полученных автором для рентгеновского аксикона. 3) Описание синхротронных экспериментов в автореферате не включает значения энергии фотонов рентгеновского пучка. 4) Текст автореферата можно было усилить примерами результатов вычислений и моделирования, полученных с помощью разработанного автором программного продукта.».
2. Отзыв из Новосибирского государственного университета (НГУ), г. Новосибирск. Отзыв составил кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры физических методов исследования твердого тела Физического факультета НГУ Ращенко С.В. Отзыв содержит замечания: «1) Можно упомянуть некоторую незавершенность анализа чувствительности параболического аксикона к нарушению осевой симметрии: несмотря на то, что в описании эксперимента упоминалась возможность юстировки положения оси аксикона, влияние ее наклона относительно падающего пучка (при нахождении центра аксикона на оси

пучка) не анализировалось. При этом очевидно, что такой наклон не эквивалентен приведенному в работе случаю перемещения щели. 2) Определенный интерес представляет теоретическая и экспериментальная форма «кривой качания» аксикона, помимо прочего численно характеризующая требования к его юстировке относительно оси пучка. 3) В разделе 1.1.2 литературного обзора диссертации дотошный читатель сможет найти несколько небольших неточностей, касающихся деталей физики синхротронного излучения.».

3. Отзыв из Академического университета им. Ж.И. Алфёрова, г. Санкт-Петербург. Отзыв составил доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории наноэлектроники, профессор Горай Л.И. Отзыв не содержит замечаний.
4. Отзыв из Федерального научно-исследовательского центра "Кристаллография и фотоника" РАН, г. Москва. Отзыв составил кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории рентгеновских методов анализа и синхротронного излучения Просеков П.А. Отзыв не содержит замечаний.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью их научных исследований, посвященных разработке рентгеновской оптики для источников синхротронного излучения, и диссертационного исследования соискателя.

Бушуев В.А., доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова является одним из ведущих российских специалистов мирового уровня в области теоретических исследований оптических свойств рентгеновской оптики, а также генерации рентгеновского излучения и его взаимодействия с веществом.

Чхало Н.И., доктор физико-математических наук, заведующий отделом многослойной рентгеновской оптики Института физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», является известным специалистом мирового уровня в области рентгеновской оптики, физики поверхности и тонких пленок. Автор более 200

научных трудов, значительная часть которых посвящена многослойной отражающей рентгеновской оптике.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) проводит фундаментальные и прикладные научные исследования в области ядерной физики. ИЯФ СО РАН - один из ведущих мировых центров по ряду областей физики высоких энергий и ускорителей, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, а также физики синхротронного излучения. В институте проводятся крупномасштабные эксперименты по физике элементарных частиц на электрон-позитронных коллайдерах и уникальном комплексе открытых плазменных ловушек, разрабатываются современные ускорители, интенсивные источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах. По большинству своих направлений институт является единственным в России и лидирующей организацией в мире в области разработки и внедрения ускорительной техники и вставных устройств для современных источников синхротронного излучения.

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

1) Разработаны методы и устройства формирования и управления волновым фронтом пучка жесткого рентгеновского излучения на основе элементов преломляющей оптики. Продемонстрированы методы формирования конического волнового фронта пучка при помощи рентгеновских преломляющих аксиконов, а также методы создания периодической пространственной структуры пучка с использованием интерферометров на основе составных преломляющих линз.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований оптических свойств параболического аксикона и систем на основе составных преломляющих линз. Показано, что:

- при когерентном рентгеновском освещении параболический аксикон формирует сходящийся пучок Бесселя, распространяющийся вдоль оптической оси, и кольцевой пучок в дальнем поле;

- интерференционная картина полос, формируемая двухлинзовым интерферометром, чувствительна к слабым изменениям волнового фронта падающего пучка, а также степени его пространственной когерентности;
- 100-линзовый интерферометр способен создавать периодическую интерференционную картину, устойчивую к искажениям волнового фронта, и позволяет гибко управлять параметрами формируемой структуры пучка: его расходимостью и шириной интерференционных полос.

2) Разработаны и экспериментально реализованы новые методы фазово-контрастной микроскопии с использованием параболического аксикона и фазово-чувствительной визуализации на основе двухлинзового интерферометра.

- На примере исследования зонной пластинки Френеля показано, что применение аксикона совместно с параболическими преломляющими линзами в качестве объектива позволяет увеличить контраст изображения исследуемого объекта в 4 раза, по сравнению с возможностями традиционного метода рентгеновской микроскопии (с 10 до 40%).
- На примере волокон различного диаметра из углерода, вольфрама и бора показано, что метод фазово-чувствительной визуализации на основе двухлинзового интерферометра дает возможность измерять абсолютные значения фазового сдвига, создаваемого образцом, предоставляя информацию о его внутренней структуре с пространственным и фазовым разрешением до 10 нм и 10 мрад соответственно.

3) Продемонстрированы возможности применения параболического аксикона и интерферометров на основе составных преломляющих линз для задач диагностики источника.

- Представлены экспериментальные результаты измерения размера источника, полученные при помощи двухлинзового и 100-линзового интерферометров. Измеренный эффективный вертикальный размер источника на исследовательских станциях ID06 и ID13B источника синхротронного излучения ESRF (Гренобль, Франция) составил 46 и 50 мкм соответственно. Показано, что ширина интерференционных полос, полученных при помощи 100-линзового интерферометра, а также контраст периодической

интерференционной картины, формируемой двухлинзовым интерферометром, главным образом определяются когерентными свойствами падающего рентгеновского излучения.

- Представлены экспериментальные результаты измерения наклона рентгеновского источника и выравнивания положения первичной щели при помощи параболических аксиконов. Измеренный наклон рентгеновского источника на исследовательской станции ID06 составил 8 градусов. Показано, что форма и симметрия изображения кольцевого пучка, формируемого параболическими аксиконами, сильно зависят от астигматизма источника, а также смещения первичной щели относительно оптической оси.

4) Представлен и экспериментально протестирован расширитель рентгеновского пучка на основе 100-линзового интерферометра. Продемонстрирована возможность гибко регулировать размер пучка синхротронного излучения в жесткой области рентгеновского спектра. Показано, что интерферометр способен с одинаковой эффективностью преобразовать падающий на него коллимированный пучок в расширяющийся пучок с угловым размером до нескольких миллирадиан, при этом сохраняя его когерентные свойства. Показано, что 100-линзовый интерферометр совместно с декогирером способен формировать расширяющийся некогерентный пучок.

5) Разработан программный продукт, основанный на алгоритмах численного расчета уравнений волновой оптики, позволяющий моделировать оптические явления распространения рентгеновского излучения, рассеянного на элементах преломляющей оптики.

- Представлены результаты численного эксперимента по субмикронной фокусировке с использованием эллиптического капилляра и параболических аксиконов. Показано, что при освещении эллиптического капилляра кольцевым пучком, сформированным параболическими аксиконами, размер сфокусированного пучка может составлять несколько сотен нанометров.
- Представлены результаты теоретических оценок и компьютерного моделирования интерферометрического подхода к визуализации тонких пленок, нанесенных на поверхность мембраны. На примере слоя золота

толщиной 8,3 нм, нанесенного на Si_3N_4 мембрану толщиной 1000 нм, показано, что предложенный подход позволяет восстановить профиль поперечного сечения золотого слоя с точностью 1 нм, с высоким пространственным разрешением.

6) Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что в ходе исследований была впервые продемонстрирована возможность формирования и управления волновым фронтом рентгеновского пучка при помощи элементов преломляющей оптики: рентгеновских параболических аксиконов и интерферометров на основе составных преломляющих линз, а также возможность их применения для когерентных методов исследований, диагностики источника и подготовки рентгеновского пучка.

В работе изучены оптические свойства формирователей пучка, экспериментально продемонстрирована эффективность их применения на источниках синхротронного излучения. Предложены, разработаны и реализованы новые методы фазово-контрастной микроскопии и фазово-чувствительной визуализации с использованием рассматриваемых оптических элементов. Проведены эксперименты по диагностике источника и юстировке оптической системы с применением параболических аксиконов, продемонстрирован расширитель рентгеновского пучка на основе многолинзового интерферометра. Представленные результаты уже сегодня имеют важное практическое значение.

Работа демонстрирует возможности разработанных методов формирования рентгеновского пучка, полноценно использующих уникальные свойства современных источников синхротронного излучения. Рассматриваемые оптические элементы могут быть эффективно использованы в методах рентгеновской интерферометрии, для формирования периодического распределения интенсивности в пространстве, в новых когерентных методах исследования, требующих сложных преобразований волнового фронта. Разработка формирователей пучка, а также развитие новых когерентных рентгеновских методов исследования на их основе сегодня имеет особое значение в связи с появлением современных источников синхротронного излучения 4-ого поколения и рентгеновских лазеров на свободных электронах.

7) Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обусловлена применением широко используемых, общепризнанных, современных теоретических моделей и экспериментальных методов исследования. Все результаты, полученные в работе, хорошо воспроизводимы, согласуются с современными теоретическими представлениями, и не противоречат известным ранее литературным данным. Результаты работы неоднократно опубликованы в реферируемых международных журналах и апробированы на профильных международных научных конференциях, семинарах и школах. Некоторые из них также подтверждены патентами на полезную модель.

8) Личный вклад автора состоял в анализе литературы по исследуемой тематике, в прямом участии в разработке методов формирования и управления волновым фронтом пучка на основе преломляющей оптики, в проектировании соответствующих рентгенооптических элементов (формирователей пучка), постановке производственных задач, выборе технологий и методов для их решения. Вклад автора был определяющим в разработке новых когерентных методов исследования, а также методов диагностики источника и подготовки рентгеновского пучка на основе предложенных оптических формирователей. Соискатель сыграл важную роль в проведении всех экспериментов по исследованию оптических свойств формирователей пучка и тестированию методов на их основе на источниках синхротронного излучения, детально освоив методику проведения синхротронного эксперимента. Автор произвел систематизацию, анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных, выполнил соответствующие теоретические исследования, аналитические оценки, расчеты, а также численные эксперименты. Соискатель внес значительный вклад в подготовку научных публикаций, самостоятельно представлял результаты настоящей работы на профильных научных конференциях, семинарах и школах.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертационная работа Зверева Д.А. «Формирователи жёсткого рентгеновского пучка на основе элементов преломляющей оптики для когерентных источников излучения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям,

13