

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Бузмакова Алексея Владимировича «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Рентгеновская томография давно и успешно используется для исследования внутренней структуры объектов, непрозрачных в видимом диапазоне длин волн. Методы неинвазивной визуализации являются сегодня одними из важнейших в развитии наук о жизни, к которым относятся гистология, медицина, микробиология, а также биохимия и ферментативная химия. Хотя названные области применения, казалось бы, не имеют прямого отношения к физическим наукам, однако развитие самих методов исследований определяется успехами современной физики конденсированного состояния, рентгеновской оптики и математических методов обработки экспериментально полученных томографических данных. Диссертация А.В. Бузмакова представляет собой явное подтверждение предыдущих утверждений. Его работа посвящена созданию приборов для рентгеновской микротомографии и развитию методов обработки томографических изображений различных медико-биологических объектов. Важно отметить, что эта диссертация включает разделы, посвящённые описанию методики разработки рентгеновского микротомографа, разработке конструкции и автоматизации прибора, подходы для повышения информативности рентгеновских изображений и их сегментации. Отдельно стоит отметить оригинальные методы постановки и проведения томографических экспериментов, разработанные автором для изучения таких объектов, которые невозможно исследовать в традиционных микротомографических подходах. В диссертации обоснован выбор метода рентгеновского фазового контраста, описаны практические задачи, решение которых привело к разработке таких новых подходов в томографических исследованиях, как метод рентгеновской топо-томографии, 4D-томографии и томографии при ограниченном поле зрения на лабораторных рентгеновских источниках. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, актуальна и практически значима.

Диссертационная работа построена классическим образом и состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 302 страницы, включая 139 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 286 наименований.

**Во введении** автором обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и положения, выносимые на защиту. В заключение сформулированы основные результаты и выводы.

**Первая глава** представляет собой обзор современного состояния исследований в области рентгеновской микротомографии. Рассматриваются и критически анализируются различные диапазоны рентгеновского излучения, а также известные схемы рентгеновской микроскопии: контактная и проекционная микротомография, использование зонных пластинок Френеля и преломляющей оптики для фокусировки излучения и увеличения изображений. Особое внимание уделено анализу возможностей метода рентгеновского фазового контраста, позволяющего существенно повысить информативность с использованием лабораторных источников. Описываются различные математические методы (интегральные и алгебраические), которые используются для реконструкции изображений в томографии. Кратко изложены методы машинного обучения и нейронных сетей для реконструкции и сегментации изображений, что облегчает понимание

разработанных автором методов, описанных в главе 3. Кроме того, автором подробно проанализированы существующие подходы к решению задач время разрешающей (4D) томографии и томографии при ограниченном поле зрения и обсуждаются возможности их использования в лабораторных микротомографах. В заключение этой главы делается вывод о том, что современный микротомограф представляет собой аппаратно-программный комплекс, объединяющий в себе оптимальные аппаратные составляющие для сбора рентгеновских изображений и алгоритмы обработки изображений, управления экспериментом и проведения томографической реконструкции. Именно развитию таких методов для расширения возможностей лабораторной микротомографии и посвящена диссертационная работа.

**Вторая глава** посвящена описанию проведения микротомографических исследований с использованием монохроматического рентгеновского излучения. В ней автор приводит свои результаты по развитию методов обработки данных томографических экспериментов и, что весьма существенно, расчету оптимальных параметров микротомографических измерений. В разделе 2.2 показано, что использование полихроматического излучения является неоптимальным для получения качественных изображений. Численными расчетами обоснован оптимальный выбор материала анодов рентгеновских трубок для объектов различной природы и их размеров с точки зрения минимальной радиационной нагрузки на образец. Важно для практики отметить сделанный в этой главе вывод о том, что диапазон длин волн 0.5-3 Å оптимально подходит для исследования биологических объектов с размерами 10-20 мм с пространственным разрешением 10-15 мкм. Именно в этом диапазоне длин волн наблюдается наилучший контраст между мягкими тканями и окружающей средой (водой), а радиационная нагрузка на исследуемый объект является минимальной.

В разделе 2.1 автором предложена рентгенооптическая схема лабораторного микротомографа, проведено её численное моделирование и обосновано достигаемое пространственное разрешение. Раздел 2.3, посвящённый оценке шумов и количества необходимых экспериментальных проекций, является основой для осознанного планирования и оптимизации томографического эксперимента. Тестирование алгоритмов проводилось с использованием достаточно трудного для восстановления объекта “фантома Шеппа-Логана”, являющегося моделью черепа человека. Проведено моделирование, которое показывает, что при работе на лабораторных источниках, обладающих высоким уровнем шума, существует оптимальный размер пикселя детектора и оптимальное количество проекций для получения наименее зашумлённой томографической реконструкции. Далее, в разделе 2.4, автор подробно описывает созданный им программно-аппаратный комплекс «ТОМАС» (томограф автоматизированный специальный).

Последние два раздела главы посвящены описанию исследований медико-биологических объектов на монохроматическом рентгеновском излучении. Проведено комплексное изучение позвонков хрящепалого геккона и образцов костей кистей конечностей на монохроматическом рентгеновском излучении с энергиями 5.4, 8.0 и 12.0 кэВ. Показано, что эти исследования хорошо согласуются с данными растровой электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа. На примере исследования образцов костей кистей конечностей продемонстрировано, что предложенная методика измерений методом монохроматической микротомографии может быть использована для определения неоднородного распределения некоторых химических элементов ввиду отличия

рентгеновского контраста при разных энергиях излучения.

**Третья глава** посвящена описанию фазоконтрастных томографических исследований биологических объектов с подробным изложением методики моделирования, работы аппаратного комплекса и обработки экспериментальных данных. В разделе 3.1 продемонстрировано, что микротомограф «ТОМАС» может использоваться для проведения фазоконтрастных измерений в «inline» схеме. Следует подчеркнуть, что такая демонстрация оказалась весьма нетривиальной ввиду низкой степени пространственной когерентности излучения лабораторного источника. Раздел 3.2 описывает созданное при непосредственном участии автора программное обеспечение, позволяющее моделировать рентгеновские схемы для когерентного и частично когерентного излучения методом его пропагирования в рабочем канале с такими оптическими элементами как щели, диафрагмы, изогнутые зеркала скользящего падения, кристаллы, преломляющие рентгеновские линзы и т.п. Приведены примеры моделирования как волнового фронта на станции рентгеновского лазера на свободных электронах, так и интенсивности фазоконтрастных изображений. Разделы 3.3-3.4 посвящены методам сегментации рентгеновских фазоконтрастных микротомографических изображений методами машинного обучения и обработки этих изображений с помощью коррекции Паганина. В этом разделе автор применяет методы классического и глубокого машинного обучения для сегментации результатов фазоконтрастной томографии биологических объектов (срез позвонка геккона, побывавшего в условиях космического полёта, эпифиз головного мозга человека), полученных на источниках синхротронного излучения. Автором показано, что оптимальным является ансамблевый метод сегментации, позволяющий существенно ускорить качество и скорость обработки экспериментальных томографических данных. В разделе 3.5 на примере исследований элементов лимбической системы человека показано применение разработанных методов обработки томографических изображений. Проведенные исследования показывают, что, по-видимому, формирование кальцификации эпифиза головного мозга человека является динамическим процессом, характеризующимся развитием и разрушением кальцифицированных зон эпифиза.

В **четвёртой главе** описываются новые схемы и алгоритмы реконструкции томографических измерений в условиях неполных данных и нестандартных геометрий. Автору удалось с привлечением разработанных итерационных методов реконструкции реализовать на лабораторных источниках томографические схемы измерения, позволяющие получать принципиально новые данные об исследуемых системах. В разделе 4.1 описан алгоритм томографической реконструкции объектов при наличии недостоверных участков на проекционных изображениях. Это позволяет, отчасти, решить проблему исследования больших объектов, не помещающихся в поле зрения детектора, или объектов с сильно поглощающими включениями. Раздел 4.2 посвящён томографическому исследованию динамических систем, изменяющихся во времени от проекции к проекции. Автором на модельных и экспериментальных данных показано, что при наличии некоторых априорных данных о динамическом процессе можно реализовать его томографию с временным разрешением. В разделе 4.3. изложен оригинальный алгоритм реконструкции в методе топо-томографии. Разработанный автором математический метод реконструкции позволяет визуализировать пространственную структуру дефектов в кристаллических объектах. В разделе 4.4 изложен метод реконструкции дефектов на вогнутой поверхности в скользящей геометрии в условиях полного внешнего отражения. Важно отметить, что все

изложенные в этой главе методы являются уникальными и открывают перед исследователями новые методы исследования сложных систем.

В качестве наиболее важных и интересных результатов, полученных в диссертации, можно отнести следующие:

1. Разработанный и экспериментально реализованный метод лабораторной рентгеновской микротомографии на монохроматическом излучении в абсорбционном и фазовом контрасте для исследования внутренней структуры объектов различной природы, в том числе и медико-биологических, с разрешением до 10 мкм при поле зрения до 20 мм.
2. Разработка оригинального итерационного подхода к томографической реконструкции изображений при использовании экспериментальных рентгеновских данных в условиях, когда часть проекций повреждена, или объект не входит в поле зрения детектора целиком.
3. Развитие топо-томографического метода для трехмерной реконструкции пространственного расположения дислокаций в кристаллах в условиях дифракции рентгеновского излучения в геометрии Лауэ (на прохождение).

По диссертационной работе А.В. Бузмакова можно сделать следующие замечания:

1. На целом ряде рисунков (рис. 2.5 на стр. 58, 3.13 на стр. 138, 4.2 на стр. 201 и др.) сравнение модельных расчетов (или данных) с восстановленными изображениями объектов основано лишь на зрительном восприятии. Желательно было бы привести более корректный критерий с соответствующим численным значением.
2. Не совсем понятно, как рассчитывался профиль интенсивности фазоконтрастного изображения пластиковой трубки на рис. 3.3 (стр. 115), поскольку используемые при этом автором соотношения (1.5) и (1.6) касаются лишь величины фазы и угла отклонения волнового вектора. Из общих соображения полезно было бы оценить длину пространственной (поперечной) когерентности излучения используемой рентгеновской трубки в плоскости расположения объекта и сравнить её с размером объекта. Выражение (1.7) для интенсивности следует все-таки из волновой теории, а не из приближения геометрической оптики, как это написано в диссертации.
3. В главе 4, посвященной реконструкции томографических изображений в условиях неполных данных, при описании алгоритма в п. 5 (стр. 209) говорится о некотором пороге разности между экспериментальными и итерационными данными. Однако далее при реконструкции ряда модельных и реальных объектов величина этого порога нигде не указывается и не обсуждается.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки материала диссертации. Все выносимые на защиту результаты, выводы и рекомендации являются новыми, обоснованными и значимыми. Совокупность выполненных автором исследований представляет собой крупное научное достижение, которое имеет важное значение в области рентгеновской оптики и вносит существенный вклад в дальнейшее развитие методов рентгеновской микроскопии и томографии, а также будет полезна для дальнейшего совершенствования аппаратуры и методики проведения рентгеновского эксперимента.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 65 статьях в отечественных и международных журналах, включая Кристаллография (13 статей), Письма в ЖЭТФ (4), УФН (1), J. Appl. Cryst. (3), J. Synchr. Rad. (1), J. Struct. Biology (1), Medical Physics (1), Tomography (1), Sensors (2), Изв. РАН. Сер. физич. (3), Biomedical Optics Express (1), Computer Optics (1), Морфология (1), Приборы и техника эксперимента (1) и др., а также в тезисах 70-ти докладов.

Диссертация хорошо оформлена и логично построена. Многочисленные рисунки и таблицы исчерпывающим образом иллюстрируют основные положения и выводы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных отечественных и зарубежных конференциях и получили высокую оценку специалистов. Автореферат и опубликованные статьи полностью соответствуют содержанию работы.

Считаю, что по объему полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости представленная работа Бузмакова А.В. «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии» полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности «Физика конденсированного состояния (1.3.8)», и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021), а ее автор, Бузмаков Алексей Владимирович, безусловно **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры физики твердого тела  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова  
доктор физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Бушуев Владимир Алексеевич  
18 марта 2024 г.

Согласен на обработку персональных данных.

Бушуев Владимир Алексеевич  
18 марта 2024 г.

Подпись проф. Владимира Алексеевича Бушуева заверяю

И.о. декана физического факультета МГУ  
Профессор

Контактные данные оппонента: тел +7(495)939-12-26, email: [vabushuev@yandex.ru](mailto:vabushuev@yandex.ru)  
Место работы: 119991, Москва, ГСП-1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы,  
д. 1, стр. 2, физический факультет, кафедра физики твердого тела