

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Общеизвестно, что рентгеновская томография является распространенным методом неразрушающего контроля промышленных изделий. Этот же метод в настоящее время является одним из основных в медицинской диагностике. Понятно, что широкое распространение томографических приборов было бы невозможно без развития методов адекватных математических методов обработки изображений и реконструкции. В связи с этим, казалось бы, что дальнейшее развитие рентгеновской томографии становится чисто техническим делом. Однако автор представляемой работы находит новое русло для развития именно физических исследований в данной области. Речь идёт о значительном повышении информативности и разрешения метода, что сделало бы его инструментом для исследования надклеточной структуры биологических объектов. В лабораторных условиях это возможно лишь с применением рентгенооптических элементов, методов фазового контраста, разработке новых экспериментальных схем и методов анализа томографических данных. Разработке таких новых методов и подходов посвящена диссертационная работа Бузмакова А.В. С учётом изложенного следует признать, что представляемая работа весьма актуальна и своевременна.

Построение диссертации достаточно традиционно. Она состоит из введения, четырёх глав, выводов. Список цитируемой литературы включает 286 публикаций, которые достаточно полно освещают существо рассматриваемой проблематики. Основные результаты по теме диссертации изложены в 65 статьях в отечественных и международных журналах и тезисах 70 докладов, что подтверждает новизну и достоверность полученных результатов.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы. Автор определяет ключевые цели и задачи работы, подчеркивает научную новизну и потенциальную практическую значимость, формулирует основные гипотезы для защиты, а также предоставляет информацию об апробации полученных результатов и публикациях по теме исследования.

**В первой главе** представлен анализ современных методов и подходов, используемых в рентгеновской микротомографии. Раздел начинается с исторического обзора, начиная от идеи Радона и работ Кормака и Хаунсфильда, до современных установок на основе синхротронного излучения. Описаны рентгенооптические компоненты, которые используются для улучшения разрешения в микротомографии при различных видах излучения. Рассмотрены физические модели формирования контраста в абсорбционной и фазовой рентгеновской микротомографии. Проведен обзор метода коррекции Паганина, который позволяет численно анализировать фазоконтрастные изображения, и, в некоторых ситуациях, восстанавливать значения действительной части показателя преломления. Это позволяет выполнять корректную томографическую реконструкцию. Автор описывает наиболее широко используемые на практике методы реконструкции. Изложены основные математические принципы, лежащие в основе указанных методов. Кратко представлены методы реконструкции и сегментирования томографических изображений, основанные на

машинном обучении. Приведено описание современных методов реконструкции томографических изображений при ограниченном поле зрения и во время разрешающей томографии

**Во второй главе** описываются подходы к разработке рентгеновских микротомографов с использованием монохроматизированного рентгеновского излучения и их применения. Автором указывается, что так как в современных лабораторных микротомографах используется жесткое тормозное излучение с широким спектром, то при томографической реконструкции не удастся получить истинный коэффициент линейного ослабления, так как разные длины волн ослабляются по-разному. Показано, что использование монохроматического излучения позволяет корректно применять методы обращения преобразования Радона. Для монохроматизации излучения предлагается использовать кристаллы-монохроматоры, которые требуют специфической конфигурации системы “источник-детектор”. Автор показывает, что, например, использование кристалла пирографита позволяет получить интенсивный расходящийся пучок и выбрать расстояние, при котором вся область будет освещена. Проведённые автором экспериментальные измерения и численное моделирование показывает, что в такой схеме возможно получить разрешение деталей объектов до 10 микрометров.

В работе проведена оценка выбора оптимальной энергии рентгеновского излучения для получения информативных изображений и микротомограмм. Численные оценки показали, что для исследования биологических объектов размером 1-20 мм с разрешением 10–15 мкм оптимальным является диапазон длин волн 0.5-1.5 Å. Автором анализируется влияние зашумлённости исходных данных, количества проекций и алгоритма реконструкции на качество томографической реконструкции. Проведённое моделирование показывает, что не всегда уменьшение пикселя детектора и увеличение числа углов является оптимальной стратегией проведения измерений. Проведение оптимизации параметров эксперимента на основе моделирования может повысить качество томографической реконструкции.

На основе рассчитанных геометрических схем и выбора оптимальных конструктивных решений был разработан и создан новый автоматизированный томограф для проведения регулярных исследований с возможностью реализовывать в дальнейшем новые схемы измерений. В последних разделах второй главы описано исследование медико-биологических объектов на монохроматическом рентгеновском излучении, проведённое как на разработанном автором автоматическом микротомографе «Томас», так и на источниках синхротронного излучения.

**В третьей главе** описаны подходы к моделированию и обработке фазоконтрастных томографических изображений. Показана возможность проведения фазоконтрастных измерений на разработанном микротомографе “Томас” с использованием широкофокусной рентгеновской трубки.

Для моделирования фазоконтрастных измерений использовалось разработанное при решающем вкладе автора программное обеспечение WavePropaGator (WPG). Описана структура программного пакета и принципы, на основании которых оно создавалось. WavePropaGator позволяет с помощью методов распространения волнового фронта моделировать прохождение импульсов рентгеновского излучения через различные рентгенооптические элементы. Описано использование WPG для моделирования фазоконтрастных изображений, получаемых на синхротронном излучении. В качестве

одного из примеров применения WPG приведён расчёт фокусировки импульсов XFEL. На примере фазоконтрастных исследований объектов сложной формы показано, что моделирование, проведённое с помощью WPG, хорошо описывает экспериментальные результаты.

Автором предложены методы сегментации рентгеновских фазоконтрастных микротомографических изображений методами машинного обучения. С помощью предложенных методов проведена сегментации образцов костной ткани различных животных на фазоконтрастных рентгеновских микротомографических изображениях.

Приведены примеры фазоконтрастных исследований элементов лимбической системы человека на лабораторных и синхротронных источниках с помощью разработанных автором методов. Исследования показали, что формирование кальцификатов в шишковидной железе человека может быть динамическим процессом, включающим развитие и разрушение кальцифицированных участков.

**Четвертая глава** посвящена описанию новых подходов для томографической реконструкции в рентгеновской микротомографии, разработанных автором для нестандартных геометрических конфигураций или условий эксперимента: томографической реконструкции в случае, когда часть проекций повреждена, или объект не входит в поле зрения детектора целиком; реконструкции объектов, изменяющихся во времени; реконструкции структуры дефектов в кристаллических объектах, когда съёмка происходит в геометрии Лауэ (топо-томография); реконструкции дефектов на вогнутой поверхности в скользящей геометрии (шепчущая галерея). Предложенные автором методы являются оригинальными, и их реализация стала возможной благодаря математическому аппарату, развиваемому автором и модульной конструкции разработанного им прибором. Стоит отметить, что описываемые автором методы исследования не являются теоретическими измышлениями, а были разработаны для решения конкретных задач, описываемых автором.

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

1. В отечественных и зарубежных лабораторных микротомографах часто используются микрофокусные источники рентгеновского излучения с широким рентгеновским спектром. Для преимущества описываемого подхода с применением монохроматического излучения автору, возможно, следовало привести примеры исследования одного и того же объекта на полихроматическом и монохроматическом излучении и сравнить их между собой.

2. При фазоконтрастных исследованиях автор рассматривает только «inline» схему. Непонятно, почему не рассматривается схема с решётками или отражающими кристаллами.

3. При экспериментальной проверке метода времяразрешающей томографии автор рассматривает простой объект – капилляр, заполняемый жидкостью. Для более эффективной демонстрации предлагаемого подхода следовало взять более сложный объект.

4. Автором не рассмотрены возможности использования в микротомографии специализированных спектрометрических детекторов рентгеновского излучения на основе микросхем TimePix/MediPix, позволяющих регистрировать не только интегральную интенсивность рентгеновского излучения, но и его состав. Будут ли они иметь преимущества над использованной автором схемы с монохроматическим излучением?

Отмеченные недостатки не затрагивают основных выводов диссертационной работы и поэтому не являются принципиальными для ее общей положительной оценки. Все

представленные результаты, выводы и рекомендации являются новыми, обоснованными и имеют важное значение. Исследования автора представляют собой значительный вклад в развитие методов рентгеновской микроскопии и томографии и будут полезны для совершенствования оборудования и методик рентгеновского анализа.

Диссертация написана в хорошем стиле, легко читается. Чувствуется, что автор хорошо владеет материалом. Разработанные методы и подходы являются новыми и оригинальными. Сравнение полученных автором результатов с приводящимися литературными данными показывает высокую степень их достоверности. Диссертация, безусловно, имеет практическую значимость и научное значение. Материалы работы опубликованы в научных журналах, апробированы на семинарах и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

На основании изложенного 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», утвержденного 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:

Декан факультета электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», доктор технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»  
Бессонов Виктор Борисович  
18 марта 2024 г.

Согласен на обработку персональных данных.

Бессонов Виктор Борисович 18 марта 2024 г.

Подпись Виктора Борисовича Бессонова заверяю



Контактные данные оппонента: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), декан факультета электроники: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.; +7(812) 234-40-63; vbbessonov@etu.ru