

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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

Диссертационная работа Бузмакова А.В. посвящена разработке, реализации и развитию аппаратурных и вычислительных методов повышения информативности и достоверности результатов рентгеновской микротомографии на лабораторных и синхротронных источниках.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что современная рентгеновская (компьютерная) томография является одним из наиболее распространенных методов неразрушающего исследования трехмерной структуры объектов, независимо от их природы. Этот метод широко применяется в различных областях, включая фундаментальные и прикладные научные исследования, медицину, а также промышленный контроль. Однако исследователи всегда стремятся к улучшению разрешения и контрастности изображений. Это приводит к появлению и активному развитию отдельного направления в рентгеновской томографии - микротомографии. Данный метод тесно связан с рентгеновской микроскопией и направлен на получение микронного или субмикронного разрешения, однако при этом область зрения метода не превышает нескольких десятков миллиметров, а иногда и сотни микрон в случае субмикронного разрешения. Но даже такие ограничения делают микротомографию полезной в широком диапазоне применения. Например, в биологии и медицине микротомография дополняет, а в ряде случаев и заменяет, гистологические методы исследования. В технологии и промышленности микротомография используется для контроля микроструктуры изделий различного применения, от микропроцессоров до пористых мембран. Поэтому рассматриваемая диссертация является актуальной, а рассматриваемые в ней подходы к конструированию рентгеновских микротомографов, алгоритмов и особенностей томографической реконструкции, а также дальнейшего анализа получаемых данных являются значимыми и практически важными.

Научная новизна диссертационной работы Бузмакова Алексея Владимировича определяется совокупностью разработанных им новых методов и подходов в аппаратурной и программной части, важными для

развития метода рентгеновской микротомографии. Аппаратурные методы, основанные на моделировании взаимодействия рентгеновского излучения с изучаемым объектом, позволяют оптимизировать экспериментальную схему для повышения контрастности рентгеновских изображений. Математические методы интерпретации фазоконтрастных изображений в сочетании с методами томографической реконструкции, основанными на итерационных алгебраических подходах, позволяют уменьшить количество артефактов и повысить точность реконструкции.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что все разработанные автором методы и рентгенооптические элементы прошли экспериментальную апробацию и подтвердили эффективность при работе на лабораторных и синхротронных источниках. Без сомнения, в дальнейшем результаты диссертационной работы найдут применения, в разработке новых микротомографических установок. Высокий практический потенциал результатов данной диссертации подтверждается, в том числе и двумя патентами, полученные при выполнении работы над диссертацией.

Диссертация 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 на научных конференциях, что подтверждает оригинальность и достоверность полученных результатов

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования. Автор определяет основные цели и задачи исследования, выделяет научную новизну и потенциальную практическую значимость своей работы. Также формулируются основные гипотезы, которые проверяются в ходе исследования, и предоставляется информация об апробации полученных результатов и публикациях по теме исследования.

Первая глава работы представляет анализ современных подходов и методов, применяемых в рентгеновской микротомографии. Автор делает краткий исторический обзор развития рентгеновской микротомографии от первых микротомографов до современных установок, использующих синхротронное излучение. В главе также подробно описываются рентгенооптические элементы, которые повышают разрешение в микротомографии в различных областях применения. Освещаются физические модели формирования контраста в абсорбционной и фазовой рентгеновской микротомографии, а также метод Паганина, позволяющий численно анализировать фазоконтрастные изображения и восстанавливать значения показателя преломления для корректной томографической

реконструкции. В главе также представлен обзор наиболее распространенных методов реконструкции и их математических принципов, а также методы реконструкции и сегментации, основанные на машинном обучении. Описаны современные методы реконструкции томографических изображений при ограниченном поле зрения и временно-разрешающей (4D) томографии.

Во второй главе диссертации описаны разработанные автором подходы в лабораторной рентгеновской микротомографии. Проведено моделирование работы рентгенооптической системы микротомографа на монохроматическом излучении. Полученные результаты показали, что использование рентгеновского излучения монохроматизированного кристаллами-монохроматорами позволяет достигнуть разрешения до 10 микрометров. На основе этих результатов был создан автоматизированный микротомограф "Томас", который позволяет проводить исследования в режиме удаленного доступа. Также были разработаны методы обработки данных для улучшения качества реконструкции.

Экспериментальные и численные исследования подтвердили преимущества монохроматического рентгеновского излучения перед полихроматическим. Также было показано, что использование различных энергий излучения позволяет идентифицировать элементы объектов.

Было проведено комплексное исследование образцов костей хрящепалого геккона. Результаты микротомографических измерений на монохроматическом излучении соответствуют данным других методов анализа, таких как растровая электронная микроскопия и рентгенофлуоресцентный анализ.

Исследование костей кистей конечностей показало, что методика монохроматической микротомографии может быть использована для картографирования химических элементов благодаря различию их рентгеновского контраста на разных энергиях излучения.

В четвёртой главе описываются новые методы реконструкции томографических измерений, разработанные автором, для работы с неполными данными, а также в условиях нестандартных геометрий эксперимента.

Автор представляет итерационный алгоритм FOVEA, разработанный им для реконструкции при ограниченном поле зрения детектора или при наличии дефектных зон на детекторе. Используя как модельные, так и экспериментальные данные, автор демонстрирует, что FOVEA значительно снижает ошибку реконструкции по сравнению с классическими методами.

Также представлен итерационный алгоритм реконструкции

динамических томографических процессов, разработанный автором. На примере исследования движения жидкости показывается, что в некоторых случаях можно проводить трехмерную реконструкцию динамического процесса, имея всего одну рентгеновскую проекцию в каждый момент времени.

Также автор представляет алгоритм реконструкции для случая дифракционной томографии (топо-томографии). На примере исследования дислокаций в кристалле кремния показывается применимость алгоритма для изучения пространственной структуры дефектов в кристаллах.

Наконец, автор разработал и реализовал алгоритм томографической реконструкции для геометрии "шепчущей галереи". Показано, что с использованием этого подхода можно исследовать поглощение тонких объектов на вогнутых сферических поверхностях в условиях скользящей геометрии.

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

1. В диссертации не рассматривается возможность использования мягкого рентгеновского излучения, хотя именно оно позволяет достигать максимального разрешения в рентгеновской микроскопии и микротомографии.

2. Автором не рассматривается вопрос об эффективности двумерных детекторов в используемом им диапазоне энергии излучения, а этот фактор очень важен для получения качественных рентгеновских изображений.

Однако отмеченные недостатки нисколько не умаляют научную и 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. Представленные результаты, выводы и рекомендации являются новаторскими, обоснованными и имеют значительное значение. Исследования автора представляют собой значительный вклад в развитие методов рентгеновской микроскопии и томографии, а также будут полезны для создания и улучшения оборудования и методик рентгеновского анализа.

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 вышеизложенного считаю, что диссертационная работа

Бузмакова А.В. «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии» полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», и отвечает требованиям, 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, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, заведующий отделом Института физики микроструктур РАН Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН)

доктор физико-математических наук по специальности
01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Чхало Николай Иванович
26 марта 2024 г.

Согласен на обработку персональных данных.

Чхало Николай Иванович 26 марта 2024 г.

Подпись Чхало Николай Иванович заверяю

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (сокращенно **ИФМ РАН** или **Институт физики микроструктур РАН**)

Учёный секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.
Гапонова

Gaponova Daria dmg@ipmras.ru
26 марта 2024



Д.М.

Контактные данные оппонента: Институт физики микроструктур РАН Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН), 603087, Нижегородская область, Кстовский район, деревня Афоново, Академическая улица, 7
Тел. : +7 (831) 417-94-75 E-mail: chkhalo@ipmras.ru