

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.136.01 (Д002.100.02),
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ИМЕНИ Ю.А.
ОСИПЬЯНА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 23.04.2024 № 5

О присуждении Бузмакову Алексею Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии» по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния», принята к защите 15.01.2024 г. (протокол заседания № 1) диссертационным советом 24.1.136.01 (Д 002.100.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 2, приказ Минобрнауки от 17.10.2019 г. № 965/нк.

Соискатель Бузмаков Алексей Владимирович, 01 июля 1983 года рождения, в 2006 году окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Рентгеновская микротомография с использованием увеличивающих рентгенооптических элементов» защитил в 2009 году в диссертационном совете Д 501.002.01 при физическом факультете МГУ. Работает в должности старшего научного сотрудника в Курчатовском комплексе кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в лаборатории рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН.

Научный консультант: Асадчиков Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией

рефлектометрии и малоуглового рассеяния Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

Чхало Николай Иванович, 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).

Бессонов Виктор Борисович, доктор технических наук, декан факультета электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Бушуев Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

На диссертацию поступили только положительные отзывы. Официальные оппоненты высказали ряд замечаний и пожеланий, в основном касающихся терминологии, а также уточняющих вопросов по экспериментам. При этом оппоненты подчеркивают, что замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки работы. Все оппоненты заключают, что диссертация Бузмакова Алексея Владимировича полностью соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, в своём положительном заключении, подписанном Банных Игорем Олеговичем, доктором технических наук, заведующим Лабораторией конструкционных сталей и сплавов им. акад. Н.Т. Гудцова (№7) ИМЕТ, и утвержденном 5 марта 2024 г. директором ИМЕТ РАН, чл.-корр. РАН В.С. Комлевым, **указала**, что «В целом, диссертация А.В. Бузмакова является самостоятельным ²завершенным оригинальным научным

исследованием, достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений», «Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, актуальна и практически значима», «Диссертантом получен ряд принципиально новых результатов, связанных с разработкой и применением лабораторных микротомографов. Предложенные автором методы проектирования и моделирования рентгенооптических систем могут быть использованы при создании не только новых лабораторных микротомографов, но и экспериментальных станций на источниках синхротронного излучения», «Достоверность полученных результатов основана на надежности и обоснованности применяемых методов, а также экспериментально подтверждена большим массивом полученных автором результатов», «По актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа Бузмакова А. В. «Аппаратурные и вычислительные методы в рентгеновской микротомографии» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 26.10.2023 г.), а её автор, Бузмаков Алексей Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. - Физика конденсированного состояния.»

Соискатель имеет более 100 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 65 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 65 работ, получено 2 патента. Результаты работы докладывались на многих престижных российских и международных семинарах и конференциях. Выборочный список наиболее значимых работ:

1. Buzmakov A., Chukalina M., Nikolaev D., Gulimova V., Saveliev S., Tereschenko E., Seregin A., Senin R., Zolotov D., Prun V., Shaefer G., Asadchikov V. Monochromatic computed microtomography using laboratory and synchrotron sources and X-ray fluorescence analysis for comprehensive analysis of structural changes in bones // Journal of Applied Crystallography. — 2015. — Vol. 48.
2. Buzmakov A., Krivonosov Y., Grigoriev M., Mogilevskiy E., Chukalina M.,

- Nikolaev D., Asadchikov V. Iterative algorithm for 4d tomography reconstruction using a single projection per time step // *IEEE Access*. — 2022. — Vol. 10. — P. 46963–46974.
3. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А., Чукалина М.В., Ингачева А.С., Ичалова Д.Е., Кривонос Ю.С., Дьячкова И.Г., Балцер М., Касселе М., Чилингарян С., Копманн А. Лабораторные микротомографы: Конструкция и алгоритмы обработки данных // *Кристаллография*. — 2018. — Vol. 63, no. 6. — P. 1007–1011.
 4. Buzmakov A., Chukalina M., Dyachkova I., Ingacheva A., Nikolaev D., Zolotov D., Schelokov I. Enhanced Tomographic Sensing Multimodality with a Crystal Analyzer // *Sensors*. — 2020. — Т. 20, №. 23. — С. 6970.
 5. Bukreeva I., Asadchikov V., Buzmakov A., Chukalina M., Ingacheva A., Korolev N. A., Bravin A., Mittone A., Biella G.E.M., Sierra A., Brun F., Massimi L., Fratini M., Cedola A. High resolution 3D visualization of the spinal cord in a post-mortem murine model // *Biomedical Optics Express*. — 2020. — Т. 11, № 4. — С. 2235–2253.
 6. Золотов Д. А., Асадчиков В. Е., Бузмаков А. В., Волков В. В., Дьячкова И. Г., Конарев П. В., Григорьев В. А., Суворов Э. В. Новые подходы к трёхмерной реконструкции дислокаций в кремнии по данным рентгеновской топомографии // *Успехи физических наук*. — 2023. — Vol. 193, no. 9. — P. 1001–1009.
 7. Samoylova L., Buzmakov A., Chubar O., Sinn H. WavePropaGator: Interactive framework for X-ray free-electron laser optics design and simulations // *Journal of Applied Crystallography*. — 2016. — Vol. 49, no. 4.
 8. Gulimova V., Proshchina A., Kharlamova A., Krivova Y., Barabanov V., Berdiev R., Asadchikov V., Buzmakov A., Zolotov D., Saveliev S. Reptiles in space missions: Results and perspectives // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2019. — Vol. 20, no. 12. — P. 3019.
 9. Якимчук И. В., Бузмаков А. В., Андреев А. В., Асадчиков В. Е. Особенности

диагностики качества вогнутых сферических поверхностей скользящим рентгеновским пучком // Журнал технической физики. — 2014. — Vol. 84, no. 1. — P. 145–149.

10. Yoon C. H., Yurkov M. V., Schneidmiller E. A., Samoylova L., Buzmakov A., Jurek Z., Ziaja B., Santra R., Loh N. D., Tschentscher T., Mancuso A. P. A comprehensive simulation framework for imaging single particles and biomolecules at the European X-ray Free-Electron Laser // Scientific Reports. — 2016. — Vol. 6, no. 1. — P. 24791.

На автореферат поступило пять положительных отзывов, в которых отмечается, что диссертация является крупным достижением и по совокупности работ создано новое научное направление. По новизне, значимости и актуальности полученных результатов диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России к докторским диссертациям.

Отзывы на автореферат дали:

Комаров Фадей Фадеевич (академик НАН Республики Беларусь, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ) и Дудчик Юрий Иванович (канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ). Отзыв об автореферате положительный, имеются два замечания. Первое замечание: «в автореферате фактически отсутствует информация о параметрах рентгеновской установки». Второе замечание: «имеет смысл пояснить, за счет чего улучшается пространственная разрешающая способность комплекса - за счет коллимации пучка, или за счет монохроматизации».

Ширяев Андрей Альбертович (доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории новых физико-химических проблем Института физической химии и электрохимии им. А.А. Фрумкина РАН). Отзыв об автореферате положительный, имеются два замечания. Первое замечание: «в качестве предложений о дальнейшей работе можно рекомендовать исследование и отработку методов томографического анализа объектов с энергиями падающего излучения вблизи краев поглощения основных химических элементов, слагающих материал, или техникой рентгенофлуоресцентной томографии». Второе замечание: «какой результат будет

получен в методе времяразрешающей томографии в случае двух перекрывающихся капилляров?»

Тихонов Алексей Михайлович (доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН). Отзыв об автореферате положительный, замечаний нет.

Кузин Сергей Вадимович (доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук). Отзыв об автореферате положительный, имеется одно замечание: «в автореферате диссертации не приведены требования к рентгенооптическим элементам, используемым в качестве монохроматоров, для обеспечения максимальной точности реконструкции данных томографического эксперимента».

Андреева Марина Алексеевна (доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доцент). Отзыв об автореферате положительный, замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются ведущими специалистами в областях физики по теме диссертации: рентгеновской микротомографии (Бессонов В.Б.), рентгеновского фазового контраста (Бушуев В.А.) и рентгеновской оптики и микроскопии (Чхало Н.И.). Ведущая организация имеет большой опыт и долгую историю работы в области физического материаловедения. Все оппоненты имеют значительное число опубликованных работ в областях, общих по тематике с диссертацией.

Диссертационный совет отмечает, что целью диссертационной работы была разработка, реализация и развитие аппаратурных и вычислительных методов повышения информативности и достоверности результатов рентгеновской

микротомографии на лабораторных и синхротронных источниках. На основании выполненных соискателем исследований получен ряд принципиально новых результатов. Теоретически и экспериментально показано, что использование кристаллов-монокроматоров для проведения микротомографических исследований позволяет достигать разрешения порядка 10 мкм даже при использовании источников с протяженным фокусным пятном. На основании проведённого моделирования разработана конструкция автоматизированного рентгеновского микротомографа "Томас", который был создан при решающем участии соискателя и в настоящее время успешно эксплуатируется. Аппаратурные и программные решения, реализованные в этом микротомографе, позволяют проводить томографические измерения в режиме удалённого доступа к прибору. Разработанные методы обработки томографических данных позволяют скорректировать возможные нарушения юстировки прибора и повысить качество томографической реконструкции. Численно и экспериментально показано, что проведение исследований с использованием нескольких энергий излучения может позволить идентифицировать элементный состав изучаемых объектов.

Разработано программное обеспечение для моделирования методом распространения волнового фронта фазоконтрастных изображений, получаемых на синхротронном излучении (WavePropaGator, сокращенно - WPG). Описаны принципы и структура, на основании которых создавалось соответствующее программное обеспечение. WPG позволяет с помощью методов распространения волнового фронта моделировать прохождение импульсов рентгеновского излучения через различные рентгенооптические элементы. Представлено использование WPG для моделирования фазоконтрастных изображений, получаемых на синхротронном излучении. Описано применение WPG для расчёта фокусировки импульсов XFEL. На примере фазоконтрастных исследований объектов сложной формы показано, что моделирование, проведённое с помощью WPG, хорошо описывает экспериментальные результаты.

Описаны методы сегментации рентгеновских фазоконтрастных микротомографических изображений методами машинного обучения. На примере сегментации образцов костной ткани предложен ансамблевый алгоритм сегментации фазоконтрастных рентгеновских микротомографических изображений. На примере

исследований элементов лимбической системы человека показано применение разработанных методов обработки томографических изображений.

Разработаны новые методы реконструкции томографических измерений в условиях неполных данных и в нестандартных геометриях. В частности, автором разработан итерационный алгоритм FOVEA (Field Of View Extension Algorithm, алгоритм расширения поля зрения) для реконструкции при ограниченном поле зрения детектора или при наличии дефектных зон на детекторе. На модельных и экспериментальных данных показано, что FOVEA позволяет на порядок сократить ошибку реконструкции по сравнению с классическими алгоритмами реконструкции.

Разработан итерационный алгоритм реконструкции динамических томографических процессов. На примере исследования движения жидкости показано, что в некоторых случаях возможно провести трёхмерную реконструкцию динамического процесса, имея только по одной рентгеновской проекции в каждый момент времени.

Разработан итерационный алгоритм реконструкции для случая дифракционной томографии (топо-томографии). На примере исследования дислокации в кристалле кремния показана применимость алгоритма для исследования пространственной структуры дефектов в кристаллах.

Разработан и реализован алгоритм томографической реконструкции для геометрии "шепчущей галереи". Показано, что с помощью предложенного подхода можно проводить исследование пространственной структуры тонких объектов на вогнутых сферических поверхностях.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что были разработаны и реализованы алгоритмы томографической реконструкции 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, а их реализация стала возможной благодаря математическому аппарату, развиваемому автором и модульной конструкции разработанного им прибора.

Разработанные автором подходы к интерпретации и анализу рентгеновских фазоконтрастных томографических изображений позволяют существенно повысить информативность и точность метода микротомографии.

Разработанные автором методы оптимизации томографических исследований позволяют уменьшить дозовую нагрузку на исследуемый объект при сохранении качества реконструкции.

Таким образом, результаты работы Бузмакова А.В. позволяют расширить экспериментальные возможности рентгеновской микротомографии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что предложенные автором методы проектирования и моделирования рентгенооптических систем были применены для лабораторных исследований, на синхротронных источниках и лазерах на свободных электронах. В дальнейшем предложенные подходы могут быть использованы при создании не только новых лабораторных микротомографов, но и станций на источниках синхротронного излучения.

Разработанные автором программы и методы по реконструкции и анализу фазоконтрастных изображений с помощью методов машинного обучения позволяют не только повысить информативность томографических измерений, но и существенно уменьшить нагрузку на специалистов, анализирующих такие реконструкции. Разработанный при непосредственном участии автора пакет WavePropaGator для расчёта распространения волновых фронтов находится в свободном доступе на сайте <https://github.com/samoylv/WPG> и активно используется на рентгеновском лазере на свободных электронах XFEL.

Предложенный автором новый подход к разработке методов обработки томографических данных для нестандартных геометрических конфигураций или условий эксперимента может быть использован для проведения оригинальных томографических измерений в тех случаях, когда классические подходы неприменимы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием

экспериментальных результатов теоретическим моделям и воспроизводимостью результатов. Результаты части экспериментов были подтверждены независимыми исследованиями. Все результаты опубликованы в международных научных журналах, в том числе в высокорейтинговых, и прошли апробацию на различных международных конференциях.

Личный вклад соискателя в работу является определяющим. Идеи подавляющего большинства экспериментов были сформулированы соискателем. Большинство экспериментальных работ также выполнено соискателем, включая проведение экспериментов, их обработку, анализ и подготовку публикаций. Вклад автора в разработку программных пакетов для томографической реконструкции и интерпретации фазоконтрастных изображений является решающим.

Диссертационный совет заключает, что диссертация Бузмакова А.В. является самостоятельной завершенной научной работой, совокупность результатов которой можно квалифицировать как значительное научное достижение. Работа Бузмакова А.В. полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

На заседании 23 апреля 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Бузмакову А.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 22 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» - 21, «против» - 0, недействительных бюллетеней - 1.

Председатель диссертационного совета,
чл.-корр. РАН



Левченко Александр Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

10

Гаврилов Сергей Сергеевич

24 апреля 2024г.