

## ОТЗЫВ

На автореферат **Чукалиной Марины Валерьевны**  
**«Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики  
для определения атомной и морфологической (пространственной)  
структуры материалов и изделий микро- и нанoeлектроники»**,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-  
математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная  
база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Представленная к защите диссертационная работа М.В. Чукалиной посвящена актуальной и важной для развития современной микро- и нанoeлектроники проблеме – созданию высокоточных измерительно-вычислительных методов рентгеновской диагностики материалов и изделий электронной компонентной базы.

Актуальность исследования не вызывает сомнений. По мере перехода к субмикронным технологическим нормам и освоения новых материалов микроэлектронная промышленность испытывает острую потребность в методах неразрушающего контроля с высоким пространственным разрешением. Традиционные методы контроля часто не обеспечивают необходимой точности или требуют разрушения образца. Рентгеновские методы, благодаря проникающей способности и элементной селективности, представляют собой перспективный инструмент, однако их возможности существенно зависят от математического и алгоритмического обеспечения.

Автор справедливо отмечает, что большинство современных рентгеновских методов являются не измерительными, а измерительно-вычислительными, то есть определяемые характеристики получаются расчетным способом на основе косвенных измерений. Это делает развитие вычислительных методов критически важным направлением исследований.

Диссертация содержит ряд оригинальных научных результатов, обладающих несомненной новизной:

1. Метод вейвлет-анализа EXAFS-спектров с контролем размера ячейки спектральных характеристик позволяет определять элементный состав координационных сфер без привлечения априорной информации и метода подгонки параметров. Это существенно упрощает и ускоряет анализ атомной структуры новых материалов.

2. Метод восстановления двумерных профилей микропучков (протонных и рентгеновских) является принципиально новым подходом, позволяющим работать с неосесимметричными пучками, что расширяет возможности сканирующих диагностических методов.

3. Уточненная модель формирования рентгенофлуоресцентных проекций с учетом поглощения в объеме образца и разработанный на ее основе метод реконструкции позволяют исследовать не только приповерхностные, но и глубоко залегающие слои без систематического занижения концентраций элементов.

4. Методы томографической реконструкции с нелинейной регуляризацией, учетом полихроматичности излучения, автоматической коррекцией геометрических параметров и компенсацией влияния сильнопоглощающих включений представляют собой комплексное решение, существенно повышающее точность и надежность томографических исследований.

5. Параметрическая модель оценки точности томографической реконструкции с учетом функционального назначения томографа является методологически важным результатом, позволяющим применять дифференцированные критерии качества.

Практическая ценность работы подтверждается следующими фактами:

- Программное обеспечение для анализа EXAFS-спектров размещено на официальном сайте синхротрона ESRF и используется международным научным сообществом на протяжении 20 лет;

- Разработанные методы томографической реконструкции внедрены в коммерческий программный продукт Smart Tomo Engine;

- Методы успешно применены для исследования широкого круга объектов: от микрометеоритов и биологических образцов до электронных компонентов и интегральных схем;

- Достигнуто существенное (до 10 раз) снижение дозовой нагрузки при томографических исследованиях, что критически важно для неразрушающего контроля изделий микроэлектроники;

- Повышение точности реконструкции (до 5 раз по различным метрикам) позволяет выявлять более мелкие дефекты и проводить прецизионные метрологические измерения.

Автореферат хорошо структурирован и полно отражает содержание диссертации. Изложение материала логично, выводы обоснованы. Качество представления научных результатов соответствует требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени доктора наук.

Особо следует отметить системный подход автора: работа охватывает все основные аспекты рентгеновской диагностики – от спектроскопических методов изучения атомной структуры до томографических методов исследования морфологии изделий, от одномерных сигналов до трехмерных распределений характеристик.

Результаты диссертации опубликованы в 71 печатной работе, из которых 28 статей в рецензируемых научных журналах (26 – в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus), что существенно превышает требования ВАК. Работы докладывались на многочисленных российских и международных конференциях высокого уровня.

У меня нет принципиальных замечаний к представленной работе. В порядке обсуждения можно отметить следующее:

1. Было бы интересно увидеть более подробное сравнение вычислительной эффективности предложенных методов с существующими аналогами;

2. Представляется перспективным развитие подходов с использованием современных методов машинного обучения, что частично отражено в работе, но может быть расширено.

Неточности технического характера:

1. На рис. 11 не приведен масштаб цветовой гаммы реконструкции сечения микрометеорита Татауин.

2. На рис. 15 подписи на вертикальной оси трудно различимы, по горизонтальной оси не указаны единицы измерений.

Однако эти замечания носят рекомендательный характер и не снижают высокой оценки проделанной работы.

Считаю, что диссертационная работа Чукалиной Марины Валерьевны представляет собой цельное и перспективное исследование. Материалы, представленные в автореферате, позволяют заключить, что актуальность темы, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований и полученных результатов в полной мере отвечают всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным Положением о

присуждении учёных степеней №842 от 24 сентября 2013 года, а автор Чукалина Марина Валерьевна заслуживает присуждения ей учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2. - электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Согласен на обработку персональных данных.

«19» сентября 2025 г.

Конарев Пётр Валерьевич



доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», старший научный сотрудник Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Контактная информация:

Почтовый адрес: 119333 г. Москва, Ленинский проспект, д. 59

Телефон: +7 499 135 54 50

Адрес электронной почты: konarev@crys.ras.ru

Подпись Конарева П.В. удостоверяю

Заместитель начальника  
сопровождения КККИФ

С.В. СТАРИКОВ

