

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Чукалиной Марины Валерьевны**

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

В последнее время в микроэлектронике развивается и осваивается большое число новых технологических процессов, решаются задачи создания принципиально новых изделий с использованием новых материалов, создаются системы на основе компонентов самых современных технологических уровней. На каждом из этапов технологического цикла создания таких изделий, а также при их последующих испытаниях под воздействием условий будущей эксплуатации, необходим контроль состояния внутренней структуры изделия.

Рентгеновское излучение в нанометровом диапазоне длин волн, обладающее высокой проникающей способностью, является наиболее информативным диагностическим инструментом, подходящим для задач микроэлектроники. Методы рентгеновского контроля давно и успешно используются для изучения атомной и морфологической внутренней структуры материалов и объектов. Рентгенофлуоресцентные методы позволяют оценить чистоту поверхностей. Рентгенография, как метод прямой визуализации, позволяет во многих случаях обнаружить наличие дефекта в изучаемой структуре. Локализация дефекта в трехмерном пространстве требует применения вычислительных методов, способных работать с большим набором рентгенограмм. Метод рентгеновской компьютерной томографии, являющийся аппаратно-программным комплексом, позволяет решать задачи локальной дефектоскопии, метрологического контроля внутренней структуры и

визуализировать внутреннюю структуру неизвестных объектов. Однако проблема состоит в необходимости регистрировать большое количество рентгенограмм, что приводит к увеличению дозовой нагрузки на исследуемый объект и к его возможной деградации. Использование томографических методов для контроля изделий микроэлектроники требует развития вычислительных методов реконструкции, способных работать с томографическими проекциями, собираемыми в условиях низкой дозовой нагрузки.

Диссертация М.В. Чукалиной посвящена созданию и исследованию измерительно-вычислительных методов рентгеновской диагностики, позволяющих определять атомную структуру природных и инженерных материалов, морфологическую структуру и локальный состав изделий микро- и нанoeлектроники. Предложенный в диссертации измерительно-вычислительный метод определения формы рентгеновских и протонных сфокусированных микрозондов может использоваться не только в сканирующих диагностических методах, но и на этапах безмасочной литографии. Таким образом, тема диссертационного исследования, несомненно, является актуальной. Теоретические выводы подтверждаются численными экспериментами и результатами измерений, проведенных в лабораторных условиях и на станциях синхротронных источников. Созданные и программно-реализованные в ходе исследования методы значительно сокращают время проведения рентгеновской диагностики, имеют большую точность по сравнению с предложенными ранее, являются новыми и подчеркивают практическую значимость диссертации.

Диссертационная работа построена классическим образом и состоит из введения, 5-ти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 327 страниц, включая 211 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 246 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность полученных результатов и приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит описание и анализ существующих моделей формирования рентгеновских сигналов и изображений в методах EXAFS спектроскопии, сканирующей микроскопии и томографии, рассмотренных в диссертационном исследовании. Сформулированы проблемы, возникающие при работе с результатами проводимых косвенных измерений. Так как модели формирования сигналов и изображений являются основой для построенных в диссертации вычислительных методов, то в первой главе также показано, что изменение условий измерения, например, использование для зондирования рентгеновских спектров вместо монохроматического излучения, приводит к необходимости уточнения модели формирования проекции, что, в свою очередь, кардинально меняет метод линеаризации томографических данных. В заключительной части первой главы сформулирован вывод о необходимости развития вычислительной части рентгеновских измерительно-вычислительных методов для их успешного применения при решении задач дефектоскопии и метрологического контроля в микроэлектронике. Следует особо подчеркнуть безусловную полезность и правильно избранный стиль изложения этой обзорной главы для улучшения восприятия всей диссертации в целом.

Вторая глава посвящена описанию предложенного автором метода вейвлет-анализа протяженной тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (EXAFS спектров). Метод позволяет в геометрической модели окружения ионизируемого атома определить радиусы ближайших координационных сфер и элементный состав каждой сферы. В методе не используется время затратная процедура подгонки параметров математической модели формирования спектра EXAFS, необходимая в используемом ранее методе обработки спектров. Обоснован выбор материнского вейвлета Морле, значения параметров которого легко соотносятся со значениями параметров геометрической модели окружения ионизируемого атома, а также рассмотрены вопросы оценки точности и пространственного разрешения вейвлет-анализа.

Автором предложен оригинальный метод конструирования и использования материнского вейвлета FEFF-Morlet, основу которого составляет

модельный спектр для одиночного акта рассеяния. Его применение целесообразно в том случае, когда пространственное разрешение, определяемое видом материнского вейвлета, не достаточно для вейвлета Морле. Такой метод впервые позволил определять радиусы ближайших координационных сфер и элементный состав каждой сферы без привлечения априорной информации об элементном составе изучаемого материала. Результаты применения метода приведены на примерах анализа EXAFS спектров, зарегистрированных от слоистых структур двойных гидроксидов и халькогенидных сверхрешеток, являющихся многообещающими кандидатами для запоминающих устройств.

Третья глава посвящена описанию предложенного автором вычислительного метода определения 2D формы протонных и рентгеновских микропучков. Использование сфокусированных пучков позволяет проводить локальную диагностику. Пространственное разрешение и точность такой диагностики зависит не только от размера пучка, но и от его формы, которая не может быть определена обычно применяемым ножевым методом при регистрации интегральной интенсивности флуоресцентного сигнала от объекта.

Метод основан на математической обработке двумерных флуоресцентных карт, формируемых при сканировании тестовых ортотропных структур микропучком, форма которого восстанавливается. Предложены схемы сканирования для двух принципиально различных случаев – при наличии у пользователя сертифицированной структуры, генерирующей флуоресцентный сигнал при ее сканировании, и при отсутствии такой структуры. Для обоих случаев представлены алгоритмы обработки регистрируемых сигналов. Знания о форме микропучка потенциально позволяют повысить точность сканирующих методов локального контроля чистоты поверхностей, методов определения локального состава изделий, облегчить и ускорить оптимизацию систем фокусировки микропучков, а также оптимизировать технологические процессы микроструктурирования поверхностей в методе безмасочной литографии.

В четвёртой главе представлены созданные автором методы томографической реконструкции для рентгенофлуоресцентной томографии и

трансмиссионной рентгеновской томографии (в схеме на просвет). Несмотря на тот факт, что методу рентгеновской томографии уже не один десяток лет, оптимизация измерительных схем, повышение пространственного разрешения, предъявление строгих требований ко времени сбора и обработки данных, требований к получаемой изделием дозовой нагрузке определяют необходимость создавать новые методы реконструкции, способные работать в накладываемых условиях. Автором предложены: 1) алгебраический метод с нелинейной регуляризацией RegART, который при работе с сильно зашумленными трансмиссионными проекциями и/или в случае малой экспозиции при сборе проекций демонстрирует бóльшую точность по сравнению с предложенными ранее; 2) метод реконструкции, который учитывает стохастичность зарегистрированных квантов в пикселях детектора, что позволяет работать в условиях нестационарной экспозиции; 3) метод реконструкции при наличии ограничений по памяти вычислителя; 4) алгебраический метод томографической реконструкции из набора рентгенофлуоресцентных проекций.

Применение предложенного метода реконструкции для задачи рентгеновской флуоресцентной томографии продемонстрировано на примерах изучения пространственного распределения трех элементов (Pd, Rb и Th) в процессе их повторного осаждения на краях абляционного отверстия на поверхности вулканического стекла до и после лазерной абляции и для восстановления распределения элементов Si, Cr и Fe в микрометеорите Татауин. Эксперименты проводились на станции ID22 источника синхротронного излучения ESRF (Франция). В главе достаточно детально обсуждается вопрос сокращения времени реконструкции. Помимо рассмотренных подходов, связанных с использованием оптимизированных вычислителей, алгоритмического ускорения путем использования быстрого преобразования Хафа вместо преобразования Радона в операторах прямого и обратного проецирования, построен также метод автоматического определения минимальной площади на проекции, содержащей тень объекта, необходимый для выполнения реконструкции без потери точности.

В пятой главе описываются построенные методы, позволяющие понизить выраженность артефактов, возникающих на реконструируемых изображениях по причине отклонения условий измерения проекций от идеальных. Дано определение идеальных условий съемки. В деталях рассмотрены проблемы неоднородного отклика ячеек позиционно-чувствительных детекторов, съемка в малоракурсном случае, съемка в полихроматическом режиме, отклонение положения оси вращения от ожидаемого. Предложен метод решения задачи условной оптимизации реконструкции при наличии в объекте сильно поглощающих включений, результаты которого продемонстрированы на примерах визуализации ряда объектов, включая вертикальные сечения участка микроструктуры. В последнем разделе главы представлен предложенный метод оценки точности реконструкции с учетом назначения томографического комплекса. Предлагается разделять томографы на три типа – исследовательские, дефектоскопы и/или машины для метрологического контроля и томографы, являющиеся частью многоступенчатой системы принятия решения. Предложено строить модель для оценки точности реконструкции с учетом требований/результатов каждого из этапов решаемой томографом задачи.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования. Автор подчёркивает, что разработанные измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики обеспечивают повышение точности и снижение дозовой нагрузки на объект при их применении.

В целом диссертация М.В. Чукалиной представляет собой завершённое научное исследование на актуальную тему. Работа характеризуется достаточной теоретической проработкой, большим объёмом оригинальных результатов, обоснованностью выводов и высокой степенью экспериментальной проверки.

По работе Чукалиной М.В. можно сделать следующие замечания:

1. Для иллюстрации оптимальности выбора материнского вейвлета Морле (стр. 65, соотношение (2.8)) желательным было бы провести численные сравнения обработки модельных спектров EXAFS с вейвлетами другого типа. Так и не ясен критерий выбора параметров Морле η и σ (рис. 2.8 на стр. 68). То же самое

касается и связи правой границы k_{max} на спектре EXAFS с величиной фактора Дебая-Валлера (стр. 81) и указания конкретной величины полуширины 0.5 \AA гауссовой кривой, введенной для сглаживания спектра EXAFS (стр. 82).

2. На шести картах реконструированного пространственного распределения элементов в тестовом капилляре (рис. 4.10 на стр. 125) сами эти элементы не указаны (солевые растворы K, Fe, Cu, As и Y).

3. При описании алгебраического метода реконструкции с нелинейной регуляризацией на примере фантома Шеппа-Логана ничего не сказано про выбор начального приближения x_0 (стр. 134) и отсутствует обоснование выбора окна медианного фильтра размером 3×3 пикселя (стр. 135).

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки представленного материала диссертации. Все выносимые на защиту научные положения, результаты, выводы и рекомендации являются новыми, значимыми, достоверными и обоснованными, что подтверждается привлечением адекватных физических моделей и алгоритмов, большим числом модельных и реальных экспериментов на современном оборудовании исследовательского класса, а также многократно апробированного программного обеспечения. Совокупность выполненных Чукалиной М.В. исследований имеет важное значение в области неразрушающего контроля изделий микро- и нанoeлектроники с высоким пространственным разрешением, вносит существенный вклад в развитие рентгеновских методов диагностики, будет полезна для совершенствования аппаратно-программных технологических комплексов, комплексов исследовательского класса и 3D-дефектоскопов.

Основные результаты изложены в 71 печатной работе, 28 из которых изданы в периодических научных журналах, рекомендованных ВАК по специальности 2.2.2. (в том числе 26 - в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus), 29 - в материалах конференций.

Диссертационная работа Чукалиной М.В. «Измерительно-вычислительные методы рентгеновской диагностики для определения атомной и морфологической (пространственной) структуры материалов и изделий микро- и

наноэлектроники» хорошо оформлена и логично построена, многочисленные рисунки и таблицы исчерпывающим образом иллюстрируют основные положения и выводы. Диссертация и автореферат удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней №842 от 24 сентября 2013 года, а их автор, Чукалина Марина Валерьевна, заслуживает присуждения ей учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2. - Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (1.3.8. – «Физика конденсированного состояния»), профессор, профессор кафедры физики твердого тела, физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»



Бушуев Владимир Алексеевич
08 декабря 2025 г.

Согласен на обработку персональных данных:



Бушуев Владимир Алексеевич
08 декабря 2025 г.

Контактные данные:

vabushuev@yandex.ru, тел. +7(985)967-12-20

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д.1, стр. 2, физический факультет

Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю:

И.о. декана физического факультета МГУ

Профессор



 В.В. Белокуров