

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Борзунова Андрея Анатольевича
на тему: «Восстановление трехмерной информации в сканирующей
электронной микроскопии при детектировании
обратно-рассеянных электронов»
по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Диссертационная работа посвящена разработке методов математического моделирования, численных алгоритмов и программного комплекса для решения обратных задач восстановления топографии поверхности и томографии приповерхностных слоёв микрообразцов по данным сканирующей электронной микроскопии в режиме детектирования обратно-рассеянных электронов.

Актуальность выбранной темы обусловлена широким распространением сканирующей электронной микроскопии в научных исследованиях и технологических процессах. Данный метод позволяет получать изображения поверхности микрообразцов с высоким пространственным разрешением и используется в материаловедении, микроэлектронике, нанотехнологиях и других областях. Однако традиционные методы обработки изображений, получаемых в сканирующей электронной микроскопии, преимущественно ориентированы на двумерный анализ и не позволяют непосредственно восстанавливать трёхмерную структуру образцов. Между тем многие свойства материалов определяются именно их пространственной структурой и топографией поверхности.

Существующие методы трёхмерной реконструкции микроструктур, такие как стереоскопические и фотометрические методы, а также методы томографии, как правило, требуют специализированного оборудования или

сложных экспериментальных процедур. В связи с этим разработка математических моделей и численных методов, позволяющих восстанавливать трёхмерную структуру микрообразцов на основе стандартных режимов работы сканирующего электронного микроскопа, является актуальной задачей. Решение таких задач позволяет существенно расширить возможности существующих экспериментальных установок и повысить информативность результатов микроскопических исследований. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту

Положения, выносимые на защиту, достаточно подробно обоснованы в соответствующих разделах диссертационной работы.

В первой главе приведён обзор современных методов исследования топографии поверхности и внутренней структуры микрообразцов, основанных на данных сканирующей электронной микроскопии. Рассматриваются стереоскопические и фотометрические методы восстановления топографии, а также методы томографии, основанные на послойном анализе и вариации ускоряющего напряжения. Проведённый анализ литературы позволяет сформулировать основные ограничения существующих подходов и обосновать необходимость разработки новых методов восстановления пространственной структуры микрообразцов.

Во второй главе рассматривается обратная задача восстановления топографии поверхности микрообразцов. Автор предлагает оригинальный метод определения локальных углов наклона поверхности на основе анализа сигналов, получаемых с четырёхквadrантного детектора обратно-рассеянных электронов. Особенностью предложенного подхода является использование этапа калибровки на образце известной геометрии, позволяющего восстановить аппаратные функции конкретной экспериментальной установки

и тем самым учитывать возможные неточности механического позиционирования детекторов. На основе восстановленных компонент градиента поверхности формулируется задача восстановления функции поверхности, которая решается методом наименьших квадратов. Разработан численный алгоритм, основанный на конечно-разностной аппроксимации и решении переопределённой системы линейных алгебраических уравнений методом сопряжённых градиентов. Приведённые вычислительные эксперименты демонстрируют возможность получения трёхмерной реконструкции микротопографии поверхности с разрешением по высоте, сопоставимым с латеральным разрешением сканирующего электронного микроскопа.

В третьей главе рассматривается обратная задача восстановления томографии приповерхностных слоёв массивных образцов. Для решения данной задачи автор строит аналитическое выражение для зависимости интенсивности сигнала сканирующего электронного микроскопа от энергии первичных электронов, толщин слоёв и их химического состава на примере трёхслойной структуры. На основе полученной модели формулируется обратная задача восстановления толщин слоёв по серии изображений, полученных при различных значениях ускоряющего напряжения. Предложены различные постановки задачи, учитывающие наличие априорной информации о структуре образца. Для решения задачи используется численный метод минимизации функционала невязки с регуляризацией, реализованный с применением алгоритма BFGS и техник автоматического дифференцирования. Проведённые численные эксперименты на тестовом Al–Au–Si образце показывают возможность восстановления толщин слоёв и построения объёмной реконструкции приповерхностной структуры.

В четвёртой главе описан разработанный прикладной программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы обработки

экспериментальных данных. Программный комплекс создан на языке программирования Julia и ориентирован на высокопроизводительные научные вычисления. Описана архитектура системы, включающая модули чтения и предварительной обработки экспериментальных данных, численной реконструкции топографии и томографии, а также средства визуализации результатов. Реализованные алгоритмы позволяют обрабатывать изображения, полученные сканирующим электронным микроскопом, и выполнять трёхмерную реконструкцию структуры микрообразцов. Представленные результаты демонстрируют практическую применимость разработанного программного комплекса для анализа данных электронной микроскопии.

Структура диссертации логична и последовательна. Представленные результаты подтверждают сформулированные положения, выносимые на защиту.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных физических моделей взаимодействия электронного пучка с веществом, применением корректных методов математического моделирования и численных методов решения обратных задач. Полученные результаты подтверждаются серией вычислительных экспериментов и сопоставлением с экспериментальными данными, полученными на реальных образцах. Результаты работы прошли апробацию на международных и российских научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Научная новизна работы

Научной новизной обладают следующие основные результаты диссертационной работы:

разработан оригинальный метод восстановления локальных углов наклона поверхности микрообразцов по сигналам четырёхквadrантного детектора обратно-рассеянных электронов, устойчивый к неточностям позиционирования детекторов;

предложен численный алгоритм трёхмерной реконструкции топографии поверхности микрообразцов на основе решения обратной задачи восстановления функции поверхности по измеренному градиенту;

построена аналитическая модель формирования сигнала сканирующего электронного микроскопа для трёхслойных структур и разработан метод восстановления толщин слоёв на основе вариации ускоряющего напряжения;

разработаны численные методы решения соответствующих обратных задач с использованием методов оптимизации и регуляризации;

создан прикладной программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы обработки данных сканирующей электронной микроскопии и позволяющий выполнять трёхмерное исследование структуры микрообразцов.

Особый интерес представляет предложенный автором подход к калибровке аппаратных функций сканирующего электронного микроскопа на основе экспериментальных данных, позволяющий учитывать реальные особенности детекторной системы и повышать точность восстановления топографии поверхности.

Замечания по работе

По содержанию диссертационной работы можно высказать следующие замечания:

В работе подробно рассматривается случай трёхслойной структуры при решении задачи томографии. Было бы полезно более подробно исследовать возможность обобщения предложенной модели на случай многослойных структур с произвольным числом слоёв и различными материалами.

При разработке метода восстановления топографии используется аппроксимация аппаратных функций, зависящих от одной переменной. Представляется интересным исследовать возможность построения более полной модели, учитывающей зависимость сигнала одновременно от двух компонент градиента поверхности.

В работе основное внимание уделено численным экспериментам на отдельных тестовых образцах. Расширение экспериментальной проверки предложенных методов на более широком наборе образцов могло бы дополнительно подтвердить универсальность разработанного подхода.

Заключение

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание работы соответствует специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по физико-математическим наукам), а также критериям, установленным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, автор диссертации Борзунов Андрей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
теоретической физики
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
российской академии наук

Зайцев Сергей Иванович

04.05.2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(496)52-442-14, e-mail: zaitsev@iptm.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
05.27.01 Твердотельная электроника, микроэлектроника

Адрес места работы:

142432, Московская обл., г. Черноголовка ул. Академика Осипьяна д. 6,
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук
Тел.: +7(496)524-40-60; e-mail: general@iptm.ru