

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 математическому моделированию, разработке численных методов и прикладного программного обеспечения для решения двух связанных обратных задач сканирующей электронной микроскопии: восстановления микротопографии поверхности и томографии приповерхностных слоёв массивных образцов. Входными данными в обеих задачах служат сигналы четырёхквadrантного детектора обратно-рассеянных электронов, фиксируемые в штатном режиме работы сканирующего электронного микроскопа.

Актуальность темы исследования

Сканирующая электронная микроскопия составляет инструментальную основу микро- и наноразмерной диагностики в материаловедении, микроэлектронике, биомедицине и ряде смежных областей. При этом её штатные режимы обеспечивают лишь двумерные растровые изображения, тогда как контроль тонкоплёночных структур, количественная оценка шероховатости требуют именно пространственной информации — как о рельефе поверхности, так и о распределении вещества по глубине. Альтернативные способы её получения либо сопряжены с установкой дополнительного прецизионного оборудования (стереоскопические схемы, атомно-силовая микроскопия), либо разрушают образец (послойное удаление материала, травление сфокусированным ионным пучком), либо ограничены классом прозрачных для электронов объектов (просвечивающая электронная томография). На этом фоне

задача извлечения трёхмерной информации непосредственно из сигналов стандартного четырёхквadrантного детектора — без модернизации прибора и без разрушения образца — представляется и практически востребованной, и методологически содержательной. Её практическая сторона состоит в расширении возможностей уже существующих сканирующих электронных микроскопов, в том числе приборов с вручную устанавливаемыми детекторами. Методологическая — в развитии аппарата некорректно поставленных задач применительно к конкретной физической модели формирования сигнала обратно-рассеянных электронов. Многие исследования выполнены в сотрудничестве с группой проф. Э.И. Рау, который является общепризнанным специалистом в области электронной микроскопии. Вышеизложенные соображения обуславливают актуальность работы.

Обоснованность положений, выносимых на защиту

Положения, вынесенные на защиту, последовательно раскрываются в тексте диссертации и подкреплены как теоретическими выкладками, так и вычислительным экспериментом.

Первая глава содержит обзор физики взаимодействия электронного пучка с веществом и современного состояния методов трёхмерной реконструкции микрообразцов. Последовательно рассмотрены стереоскопические и фотометрические подходы, восстановление формы по фокусу, а также методы томографии — деструктивные послойные и основанные на варьировании ускоряющего напряжения. Обзор завершается выделением нерешённых вопросов, к которым обращены последующие главы; научной новизны глава не содержит и не претендует на неё.

Во второй главе рассматривается обратная задача восстановления топографии поверхности. Введена аппаратная функция, связывающая компоненты градиента поверхности с сигналом в топографическом контрасте, и

эмпирически строится по изображениям калибровочной поверхности известной геометрии. Принципиальный методологический шаг — допущение о разделимости двумерной аппаратной функции на две независимые одномерные составляющие вдоль осей по которым расположены пары детекторов. Это упрощение, опирающееся на предполагаемую гладкость восстанавливаемых поверхностей и малость локальных углов наклона, позволяет свести задачу идентификации многомерной функции отклика к восстановлению двух одномерных зависимостей. Обратные к ним функции строятся по огибающей экспериментального набора сеточных значений с последующей полиномиальной аппроксимацией, что предоставляет простой и устойчивый способ обхода эффекта неоднозначности сигнала. Задача восстановления функции поверхности по её градиенту сводится к переопределённой системе линейных алгебраических уравнений, порождаемой конечно-разностной аппроксимацией оператора градиента, и решается методом наименьших квадратов. Приведённые реконструкции рельефа — многоуровневой пирамиды тестового образца, отпечатков индентора Виккерса на серебряной и железной пластинах, оловянно-медной структуры — демонстрируют разрешение по высоте, сопоставимое с латеральным разрешением прибора.

Третья глава содержит аналитическую модель формирования сигнала обратно-рассеянных электронов для трёхслойной структуры «покровный слой — промежуточный слой — массивная подложка». Модель построена путём последовательного учёта энергетических потерь электронов в покровном слое, затухания потока, коэффициента обратного рассеяния «эффективной подложки» и полуэмпирического выражения для функции отклика детектора. На её основе сформулирована обратная задача восстановления толщин слоёв по серии изображений, полученных при различных значениях ускоряющего напряжения. Задача поставлена в двух вариантах учёта априорной информации — о постоянстве толщин в выделенной области образца и о суммарной толщине покрытия, — что реализовано соответствующими регуляризирующими

добавками в функционал невязки. Минимизация проведена с помощью квазиньютоновского подхода для ограниченной области в сочетании с техникой автоматического дифференцирования. Работоспособность подхода апробирована на тестовом Al–Au–Si образце с четырьмя участками заранее известной толщины золотого слоя, для которого выполнена объёмная реконструкция приповерхностной структуры.

В четвёртой главе описан прикладной программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы. Комплекс написан на языке Julia и поставляется в виде библиотеки и консольного приложения. Архитектура включает модули чтения растровых изображений в формате TIFF, предварительной обработки (взаимное совмещение каналов детекторов, компенсация фонового наклона образца), восстановления топографии, восстановления толщин слоёв и выгрузки результатов в формат среды ParaView. Задействованы внешние библиотеки автоматического дифференцирования, численной оптимизации и визуализации; для задач томографии, решаемых независимо в каждой точке изображения, предусмотрен многопоточный режим работы. Тем самым алгоритмы второй и третьей глав доведены до уровня прикладного инженерного инструмента.

Структура диссертации выстроена логично, полученные результаты согласуются с положениями, выносимыми на защиту.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным использованием физических моделей взаимодействия электронов с веществом и принятых в литературе эмпирических зависимостей (коэффициент обратного рассеяния, глубина пробега электронов, энергетические потери); последовательным применением стандартного математического аппарата теории обратных задач — метода наименьших квадратов, тихоновской регуляризации, квазиньютоновской оптимизации; согласованностью численных

реконструкций с экспериментальными данными, полученными на калибровочных и тестовых образцах известной геометрии.

Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях и прошли апробацию на научных конференциях.

Научная новизна работы

Научной новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

- процедура эмпирической калибровки аппаратных функций четырёхквadrантного детектора обратно-рассеянных электронов, проводимая непосредственно на том экземпляре прибора, на котором в дальнейшем выполняются измерения, и позволяющая учесть индивидуальные геометрические погрешности его детекторной системы;
- численная схема решения обратной задачи восстановления толщин слоёв с тихоновской регуляризацией, двумя вариантами учёта априорной информации (о постоянстве толщин в области, о суммарной толщине покрытия);
- прикладной программный комплекс на языке Julia, интегрирующий разработанные алгоритмы в единый инструмент и пригодный к развёртыванию на типовой рабочей станции сканирующего электронного микроскопа.

Среди перечисленных результатов особо следует выделить перенос процедуры калибровки аппаратной функции с уровня «идеализированного» теоретического описания прибора на уровень конкретного экземпляра установки. Такой приём превращает механические неточности юстировки детекторов из источника неустранимой систематической ошибки в параметры модели и существенно повышает устойчивость метода к реальной конфигурации эксперимента.

Замечания по работе

Тематика диссертации достаточно актуальная и сложная, поэтому к работе есть ряд вопросов, некоторые из которых имеют характер замечаний и/или пожеланий по дальнейшему развитию.

1. Работа безусловно интересна с научной точки зрения. Но для практического внедрения результатов, целесообразно провести патентный поиск и более наглядно показать улучшение качества трехмерной информации или удешевление стоимости оборудования по сравнению с известными методиками/приборами. Также представляется интересным узнать мнение автора о применимости методов машинного обучения к рассматриваемой задаче.
2. В защищаемых положениях не приведены количественные показатели, например «повышенной устойчивости к погрешностям». В тексте диссертации приводятся ориентиры по точности метода, но строгий анализ и оценка не проведены. Также оппонент не нашел информации по скорости работы программного комплекса – например, подходит ли он для обработки изображений в режиме реального времени?
3. Центральное для второй главы допущение о разделимости двумерной аппаратной функции на две независимые одномерные составляющие хотя и оговаривается автором как приближение, применимое при малых локальных углах наклона, но в работе отсутствует количественная оценка погрешности, вносимой этим приближением. Приведение сопоставления восстановленного рельефа с независимым измерением (например, данными атомно-силовой микроскопии того же участка) существенно укрепило бы обоснование метода.
4. Аналитическая модель сигнала для трёхслойной структуры содержит значительное число эмпирических коэффициентов, заимствованных из различных литературных источников (показатели A и p для материалов мишени, константы в выражениях для глубины свободного пробега и функции отклика детектора). Анализ чувствительности восстанавливаемых толщин к

неопределённости этих коэффициентов в работе не проведён, что оставляет открытым вопрос о переносимости метода на образцы иного химического состава без дополнительной подстройки.

5. Экспериментальная верификация метода томографии выполнена на единственном тестовом образце Al–Au–Si. Для демонстрации заявленной универсальности аналитического выражения, которое, по утверждению автора, «легко адаптировать для других материалов», желательно было бы привести хотя бы ещё один трёхслойный образец с иной комбинацией материалов.

6. Также следует отметить, что работа весьма лаконичная – объем содержательных глав 2-4 составляет около 50 страниц.

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 учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент

И.К. Гайнуллин
04.05.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, отделение радиофизики и электроники, кафедра физической электроники, доцент

Контактные данные:

тел.: +7(495) 939-19-79, e-mail: Ivan.Gainullin@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1.3.5. Физическая электроника

Адрес места работы:

119992, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2, физический факультет,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Тел.: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info.ff@org.msu.ru

Подпись сотрудника физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова удостоверяю:

И.о. декана физического факультета,
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. Белокуров