

Кошев Николай Александрович

**Методы реконструкции спектров и изображений в
растровой электронной микроскопии в режиме
отраженных электронов**

05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2012

Работа выполнена на кафедре физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

Научный
руководитель

Ягола Анатолий Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные
оппоненты:

Леонов Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Национальный исследовательский ядерный
университет "МИФИ", профессор

Лукьянов Альберт Евдокимович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
МГУ имени М. В. Ломоносова,
физический факультет,
старший научный сотрудник

Ведущая
организация

Российский университет
дружбы народов (РУДН)

Защита состоится: 5 октября 2012 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 501.002.09 при Московском университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 4, НИВЦ МГУ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., 27)

Автореферат разослан « » июня 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суворов В. В.

Общая характеристика работы

В связи с бурным развитием микро- и нанотехнологий все большую актуальность приобретают неразрушающие методы исследования объектов как естественного, так и искусственного происхождения. В частности, вместе с уменьшением линейных размеров трехмерных структур микро- и наноэлектроники, становится все сложнее осуществлять контроль качества и приборных устройств на их основе, таких, например, как планарные многослойные интегральные микросхемы. В МГУ им. М.В. Ломоносова профессором Э.И. Рау был разработан и реализован новый метод микротомографии в сканирующей электронной микроскопии, базирующийся на анализе энергетических потерь обратно рассеянных электронов. Данный метод, в сравнении с другими методами микротомографии, использующими электронный микроскоп, обладает такими весомыми преимуществами, как, например, возможность получения информации о заданном слое исследуемого объекта, характеризуемого глубиной его залегания под поверхностью объекта. Этот метод, подобно всем другим методам, имеет аппаратные ограничения. Диссертационная работа посвящена исследованию и решению задач реконструкции сигнала, возникающих при использовании растрового электронного микроскопа (РЭМ) в режиме обратно рассеянных электронов (ОРЭ).

Актуальность Методика микротомографии в ОРЭ имеет некоторые аппаратные ограничения, связанные, в частности, с ненулевым радиусом электронного зонда, размыванием зонда по мере проникновения вглубь исследуемого образца, некоторым распределением плотности тока в сечении зонда, энергетической дисперсией электронов зонда и отраженных электронов и др. Все эти факторы в совокупности приводят к ограничению возможностей метода по разрешению получаемых изображений при сильном увеличении или большой глубине залегания исследуемого слоя, некоторому наложению близлежащих слоёв объекта (что также отражается на разрешающей способности методики). Воздействие аппаратной функции спектрометра приводит к искажению энергетического спектра электронов, отраженных объектом исследования, что затрудняет спектральный анализ. Подробнее эти эффекты будут рассмотрены ниже. В то же время научно-технический прогресс требует увеличения точности диагностики и исследования микроструктур. К сожалению, аппаратура не всегда позволяет получить

желаемую точность, а увеличение аппаратной точности на малую величину часто представляет собой очень сложную и дорогостоящую задачу. Совокупность факторов, описанных выше, приводит к актуальности исследования, разработки и реализации математических методов повышения точности. Под задачей реконструкции сигнала электронного микроскопа подразумевается сведение воздействия аппаратных эффектов установки к минимуму и получение как можно более "чистого" сигнала (получить "идеальный" сигнал, очевидно, невозможно) и является обратной задачей, входные данные которой задаются с некоторой погрешностью. Рассматриваемая задача реконструкции не отвечает требованиям устойчивости относительно малых погрешностей входных данных. Стоит отметить, что чуть более века назад решение таких задач не представлялось возможным и они считались не более, чем интересной математической абстракцией. Для выделения класса задач, которые в то время можно было решить, Ж.Адамаром было введено понятие корректной задачи. Он предложил называть корректными задачи, решение которых существует, единственно и устойчиво по отношению к малым изменениям входных данных. Задачи, не удовлетворяющие данным условиям, называются некорректными или некорректно поставленными. Однако, по мере развития естественных наук оказалось, что большинство обратных задач прикладной физики и химии не являются корректно поставленными, что дало толчок для развития теории некорректных задач, начало которой было положено академиком А.Н.Тихоновым в 60-х годах XX века. Эта теория была основана на понятии регуляризующего алгоритма, гарантирующего приближенному решению свойства существования, единственности, устойчивости и близости к точному решению. После основополагающих работ А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева и В.К. Иванова теория решения некорректно поставленных задач была развита многими математиками. Рассматриваемые в работе задачи являются некорректными в силу того, что их решение не удовлетворяет условию устойчивости по отношению к погрешности входных данных.

Задача микротомографии, в сущности, является трехмерной задачей. Обусловлено это, во-первых, трехмерностью исследуемых структур, и, во-вторых, трехмерной аппаратной функцией прибора. Наряду с латеральным "размытием" электронного зонда присутствует энергетическая дисперсия пучка электронов, увеличивающаяся по мере проникновения луча вглубь исследуемого объекта. Кроме того, в случае

неоднородности слоя вещества, лежащего ближе к поверхности, нежели исследуемый слой, меняется и механизм латерального "размытия", что приводит к нелинейности задачи микротомографии в отраженных электронах, поставленной в общем виде. Однако такая постановка задачи сама по себе является очень сложной интегральной задачей, что объясняется наличием большого количества независимых переменных: помимо пространственных переменных наличествуют также "энергетические" переменные, число которых нелинейно зависит от структуры конкретного исследуемого объекта (его слоистости - количества неоднородностей, расположенных в разных слоях, их вещественного состава и т.д.). Более упрощенная постановка задачи, опирающаяся на приближение "тонких" слоев, хотя и является принципиально возможной (как показано в п. 1.4.1), упирается, однако, в недостаточность развитости физической модели отражения электронов твердым телом. В силу описанных причин в данной работе решается лишь задача восстановления изображения слоя, представляющая собой двумерную постановку задачи восстановления изображения, справедливую в предположении однородности вышележащих слоев.

Цель Цель работы состояла в исследовании и решении следующих проблем искажения сигнала РЭМ в отраженных электронах:

- Исследование механизма искажения спектра отраженных электронов спектрометром и детектором электронов (микрочанальной пластиной); математическая постановка задачи восстановления указанного спектра на основании проведенного исследования; разработка комплекса программ, реализующего методы решения данной задачи.
- Исследование механизма искажения изображения, получаемого при помощи РЭМ и связанного с конечным радиусом электронного зонда; математическая постановка задачи восстановления истинного коэффициента отражения электронов материалом исследуемого образца; исследование, разработка и адаптация методов решения данной задачи; разработка программного комплекса, реализующая указанные методы.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Выбор модели искажения двумерного изображения, получаемого при помощи сигнала РЭМ в режиме отраженных электронов, и

определение аппаратной функции преобразования сигнала на основе экспериментальных данных. Описание и постановка задачи восстановления дефокусированного зашумленного изображения.

2. Определение функции преобразования энергетического спектра электронов в тороидальном спектрометре и детекторе электронов на основе экспериментальных данных. Описание и постановка задачи восстановления истинного спектра.
3. Применение методов решения интегральных уравнений Фредгольма I-го рода в пространствах W_2^1 и VH для решения задачи восстановления истинного спектра отраженных электронов и задачи восстановления изображения слоя исследуемого объекта.
4. Адаптивный алгоритм решения обратных задач, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма I-го рода.
5. Сравнительный анализ методов двумерной реконструкции изображений.
6. Комплекс программ, реализующий устойчивые методы решения задач микротомографии в отраженных электронах.

Научная новизна Автором был исследован механизм искажения изображений, полученных при помощи РЭМ, установлена аппаратная функция искажения сигнала РЭМ в режиме ОРЭ, проведена постановка задачи реконструкции двумерного сигнала. Также была поставлена задача восстановления энергетического спектра отраженных электронов с учетом актуальной на данный момент аппаратной функции тороидального спектрометра. Последняя была получена автором на основании проведенного эксперимента. Впервые разрешены в энергетическом спектре пики, приходящиеся на упруго отраженные от поверхности электроны, что делает принципиально возможной постановку задач определения толщин пленок и материалов, из которых состоит исследуемый объект.

Для решения задач реконструкции, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма первого рода, автором были рассмотрены и предложены методы решения, такие, как: решение в пространстве W_2^1 с использованием равномерных сеток; метод решения на классе функций с ограниченной полной вариацией.

Автором (в соавторстве с доц. Л. Бейлиной) также был разработан адаптивный метод решения двумерных уравнений Фредгольма I-го

рода на неравномерных сетках; в ходе разработки метода были доказаны две теоремы, на базе которых производится наиболее эффективная адаптация (сгущение) неравномерных сеток к конкретной задаче.

Все методы были реализованы в виде программного комплекса, допускающего использование широкого класса ядер для интегральных уравнений Фредгольма I-го рода. Получены результаты обработки с использованием данного комплекса экспериментальных данных микротомографии в отраженных электронах.

Практическая значимость работы Результаты, полученные в работе, могут быть успешно применены для реконструкции сигнала РЭМ в режиме отраженных электронов с целью повышения пространственного разрешения изображений слоев для более точного диагностирования дефектов и исследования тонких эффектов в планарных микросхемах. Восстановление энергетического спектра может успешно применяться для определения структуры исследуемого объекта и материалов, составляющих его. Аппаратная функция со схожими параметрами может быть записана для ряда задач, обладающих свойствами рассеяния (например, атмосферное рассеяние, рассеяние света звезд туманностями и т.п.). Комплекс программ разработан таким образом, что аппаратная функция легко может быть заменена другой для решения задач восстановления изображений, например, смазывания и дефокусировки.

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы были представлены: на XXIII международной конференции по электронной микроскопии (Черноголовка, 2010); на научном семинаре кафедры физики Пензенского государственного архитектурно-строительного университета (Пенза, февраль 2011г.); на научном семинаре "Computational and Applied Mathematics" в Технологическом университете CHALMERS (Гетеборг, Швеция, 6.04.2011); на первой ежегодной международной конференции по обратным задачам (Гетеборг, Швеция, 3.06.2011); на Международном конгрессе ISAAC-2011 (Москва, 25.08.2011); на научном семинаре "Computational and Applied Mathematics" в Технологическом университете CHALMERS (Гетеборг, Швеция, 7.09.2011); на научном семинаре кафедры общей физики и ядерного синтеза МЭИ (ТУ) (Москва, 19.10.2011); на научном семинаре кафедры физической электроники физического факультета МГУ М.В. Ломоносова (Москва, 20.10.2011); на научном семинаре "Обратные задачи математической физики", проводящемся в НИВЦ МГУ (Москва, 09.11.2011).

Публикации По теме работы на данный момент опубликовано 4 работы, из которых 3 статьи в рецензируемых печатных изданиях и одни тезисы конференций. В журналах из списка ВАК опубликовано 3 статьи.

Структура работы Диссертация состоит из введения, 3-х глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 110 стр., в том числе 35 рисунков, список цитируемой литературы включает 97 наименований.

Краткое содержание работы

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** подробно описана методика микроскопии, спектроскопии и микротомографии в отраженных электронах, обозначена проблематика данной методики, выделены и поставлены обратные задачи, проведено исследование возможности постановки задачи микротомографии. В ходе последнего исследования выявилась недостаточность существующей физической модели отражения электронов твердым телом для постановки указанной задачи.

Прибор микротомографии сконструирован на базе растрового электронного микроскопа, работающего в режиме отраженных электронов, т.е. регистрируется не прошедший через исследуемый объект пучок электронов, а часть прямого пучка, отраженная объектом в направлении, обратном его движению. При этом методика микротомографии основана на применении к отраженным электронам энергетического фильтра, реализованного в виде тороидального спектрометра.

На рис. 1 приведена схема установки микротомографа.

Электронный зонд (моноэнергетический пучок электронов) 1 нормально падает на объект исследования 2, находящийся на металлической подложке 3. Часть пучка отражается с различных глубин объекта и попадает на вход спектрометра 4. С детектора 5, фиксирующего интенсивность сигнала, пропорциональную количеству попавших на них электронов, сигнал поступает на видеоконтрольное устройство 6 или персональный компьютер 7. На спектрометр от источника 8 подаётся либо постоянное напряжение $\pm V$ (для получения томографических снимков), либо пилообразное напряжение, необходимое для автоматической регистрации спектра отражённых электронов. Фильтрация отражённых электронов по энергиям при помощи спектрометра позволяет фиксировать только те из них, которые отражаются с глубины

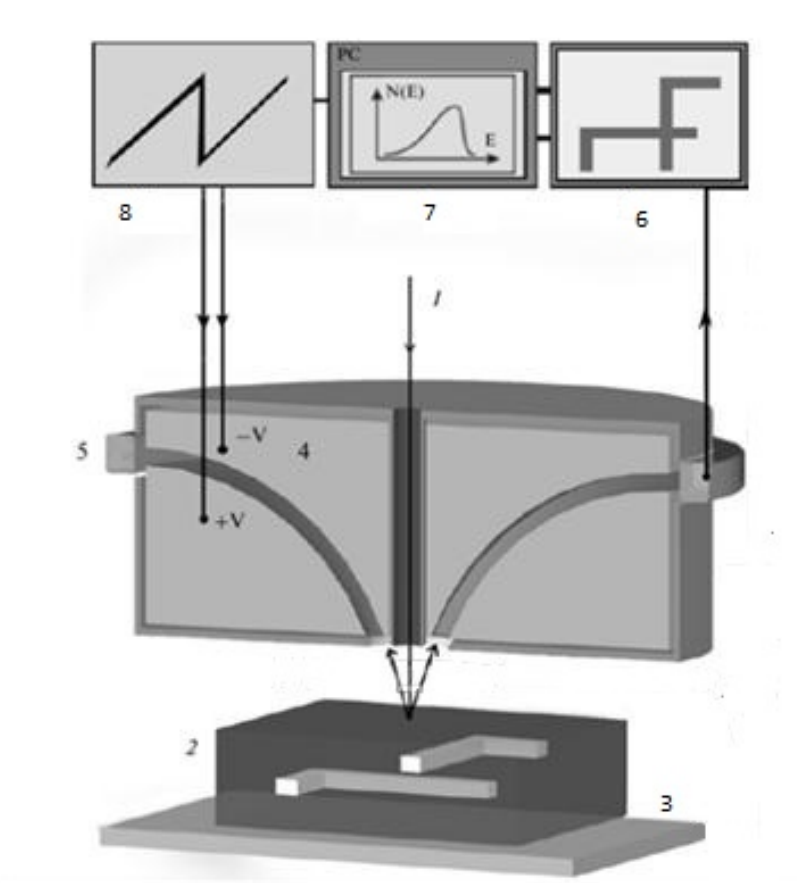


Рис. 1. Схематичное изображение установки микротомографа.

залегания исследуемого слоя объекта, определяемой, в частности, энергиями первичного пучка (зонда РЭМ) и отраженных электронов.

Сигнал S со спектрометра (см. рис. 1) прямо пропорционален энергии E_s прошедших через анализатор электронов и числу $N = I_0 \eta \Omega \Delta E$ этих электронов в энергетическом окне $\Delta E = C E_s$:

$$I_s = C I_0 \Omega \eta(\rho t) E_s^2 = C_0 \eta(\rho t) E_s^2 \quad (1)$$

где $\eta(\rho t)$ - коэффициент отраженных электронов от слоя с массовой толщиной ρt , C_0 - параметр, определяемый геометрией эксперимента. Здесь Ω - телесный угол детектирования электронов, заданный углом отражения θ и геометрией спектрометра.

В общем случае глубина зондирования λ связана с энергиями E_0 , E_s и углом детектирования $\theta_0 = 25^\circ$ приближенным соотношением 1:

¹Гостев А.В., Дицман С.А., Лукьянов Ф.А., Орликовский Н.А., Рау Э.И., Сеннов Р.А. // Метод и аппаратура микротомографии в сканирующей электронной микроскопии. Приборы и техника эксперимента, №4, с.124-134, 2010.

$$\frac{E_s}{E_0} = \left[1 - \frac{\lambda}{R_0} \left(1 + \frac{1}{\cos\theta_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \approx \left[1 - \frac{2.1\lambda}{R_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Используя два последних соотношения, получаем:

$$I_s = C_0 \eta(\rho t) E_0^2 \left(1 - \frac{2.1\lambda}{R_0} \right) \quad (3)$$

Таким образом, выбирая энергию E_0 и подбирая анализируемую энергию ОРЭ (энергию настройки спектрометра) E_s соответствующей желаемой глубине зондирования λ , можно получать информацию о составе и строении исследуемого подповерхностного слоя, а также получать его изображение.

Виды сигналов РЭМ и их проблематика.

Первым и самым простым видом получаемой информации является линейный профиль слоя с неоднородностью, получаемый посредством снятия интенсивности сигнала отраженных электронов при линейном движении зонда над образцом и постоянной настройке на некоторую глубину. При этом коэффициент отражения, а с ним и регистрируемый сигнал, будет зависеть от атомного номера вещества мишени. Как итог, получается некоторая кривая зависимости сигнала от положения зонда, по которой можно судить о строении мишени вдоль прямой движения зонда. Сигнал, получаемый таким образом, подвержен некоторому искажению, связанному с размытием электронного пучка при проникновении вглубь мишени. Вследствие этого резкие края неоднородностей "расплываются"; пространственное разрешение прибора зависит от глубины залегания исследуемого слоя и свойств вещества. На данный момент времени посредством фильтрации отраженных электронов по энергиям достигается разрешение от десятых долей до единиц микрометров.

Эта же проблема проявляется естественным образом и при получении изображения исследуемого слоя мишени: фактически, каждый линейный профиль, описанный выше, является "срезом" такого изображения; последнее же строится построчно как совокупность таких профилей.

Помимо "прямой" информации о структуре вещества, прибор также позволяет получать косвенную информацию; так, энергетический спектр отраженных электронов также позволяет судить о строении мишени. Например, при отсутствии информации о веществах, со-

ставляющих мишень, атомные номера удобнее восстанавливать как раз действуя таким методом. Кроме того, при наличии неоднородностей их влияние также сказывается на спектре ОРЭ. Однако нужно принимать в расчет неидеальность спектрометра: наличие аберраций, конечную ширину щелей, внутреннее переотражение электронов на электродах спектрометра, приборную функцию. Все вышеперечисленные факторы ведут к появлению некоторой аппаратной функции, оказывающей влияние на кривую энергетического спектра. Задача восстановления спектра является важной задачей электронной микроскопии и, в числе прочих, была рассмотрена и решена в данной работе с учетом актуальной на данный момент аппаратуры.

Задача реконструкции изображения.

Плотность тока в поперечном сечении пучка может быть определена исходя из выражения:

$$k(x, y) = \frac{1}{2\pi r'^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r'^2}\right) \quad (4)$$

где r' – радиус зонда РЭМ, равный r_0 на поверхности и определяемый по мере проникновения на глубину t под поверхность исследуемого образца выражением:

$$r' = r_0^2 + 0.625\left(\frac{Z}{E_0}\right)\left(\frac{\rho}{A}\right)^{0.5} t^{1.5}, \quad (5)$$

где Z, A, ρ – соответственно атомный номер, атомный вес и плотность вещества мишени. Здесь r_0, r' и t выражены в [мкм], E_0 – в [кэВ], ρ – в [г·см⁻³]. Данная формула получена в допущении однократного упругого рассеяния электронов по закону Резерфорда из центра пленки толщиной t . Выражение (4) было проверено автором экспериментально.

Изображение объекта формируется посредством измерения интегральной интенсивности пучка отраженных электронов при сканировании зондом объекта. Сканирование производится "построчно". Полученная интенсивность записывается в точке плоского изображения, которая отвечает латеральному положению зонда в данный момент времени (в дальнейшем – в плоскости изображения). Изображение поступает на экран персонального компьютера. При этом в силу ненулевого радиуса первичного пучка картина несколько искажается.

Сигнал в точке (ξ, η) определяется следующим выражением:

$$u(\xi, \eta) = \iint_{\mathbb{R}^2} k(\xi - x, \eta - y)z(x, y)dxdy \quad (6)$$

или $u = k * z$, где $z(x, y)$ - истинный коэффициент отражения электронов в точке (x, y) плоскости исследуемого слоя. Задача состоит в вычислении $z(x, y)$ при известных u и k и является некорректной.

Далее, без ограничения общности, будем рассматривать задачу (6) только в области $B = \{x, y : 0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1\}$. Данное предположение целесообразно ввести вследствие ограниченности размера измеряемой области и размера кадра, а также в целях упрощения дальнейших расчетов и выкладок. Таким образом, интеграл в уравнении (6) может быть взят только по области B .

При решении задачи метрологии (т.е. задачи измерения точных размеров неоднородности) в восстановлении изображения нет необходимости. При этом, в целях обеспечения решению большей устойчивости и снижения количества компьютерного времени и ресурсов, необходимых для расчета, задача (6) может быть сведена к совокупности одномерных уравнений типа свертки.

Восстановление спектра отраженных электронов.

Спектр электронов, отраженных от мишени, естественным образом подвергается искажению со стороны спектрометра и микроканальной пластины (детектора электронов), обладающих собственной аппаратной характеристикой.

Задача восстановления истинного энергетического спектра $N(E)$ описывается интегральным уравнением Фредгольма:

$$I(E_s) = \int_0^{E_0} k_s(E_s, E)N(E)dE \quad (7)$$

здесь $I(E_s)$ - регистрируемый сигнал, $k_s(E_s, E)$ - измеренная двумерная аппаратная функция спектрометра, задаваемая численно.

Для получения двумерного ядра уравнения (7) автор использовал процедуру двумерной интерполяции. Результирующее ядро представлено на рис. 2.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** рассмотрены методы регуляризации поставленных некорректных задач. Методы основаны на минимизации функционала А.Н. Тихонова с последующим выбором параметра регуляризации по обобщённому принципу невязки или простым подбором. Минимизация функционала А.Н. Тихонова осуществляется как итера-

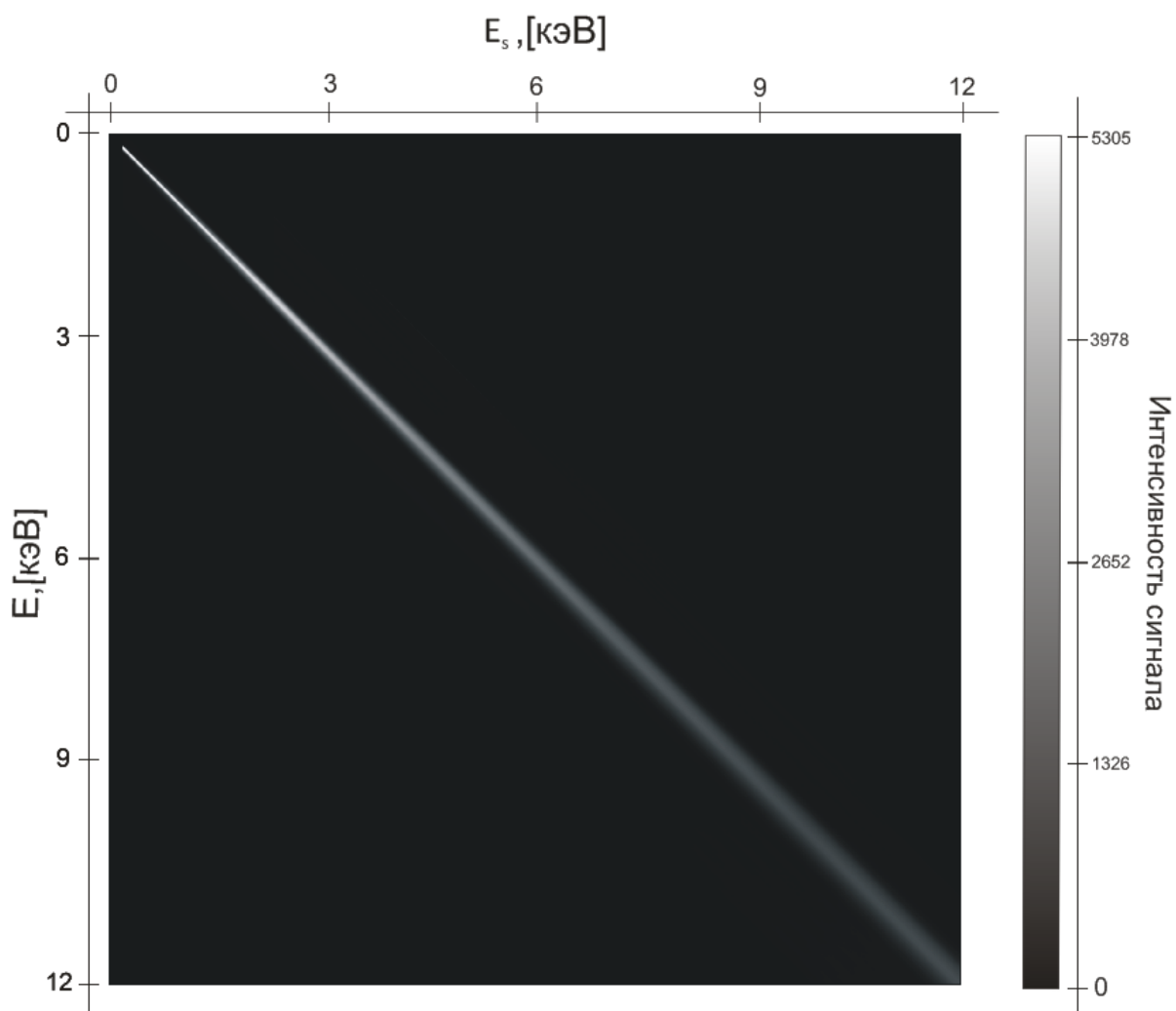


Рис. 2. Двумерная интерполяция аппаратных характеристик спектрометра и микроканальной пластины в диапазоне $[0, 12]$ кэВ.

ционными методами (методом проекций сопряженных градиентов), так и прямым вычислением минимума функционала А.Н. Тихонова (для одномерных и двумерных уравнений типа свертки).

Одномерная задача реконструкции спектра.

Задача реконструкции спектра сводится к решению уравнения (7).

Задача решения данного уравнения является некорректно поставленной. Для ее решения рассматривается функционал А.Н. Тихонова:

$$M_\alpha(N) = \|AN - I\|_{L_2}^2 + \alpha \|N\|_{W_1^1}^2 \quad (8)$$

где A - интегральный оператор, представленный формулой:

$$AN = \int_0^{E_0} k_s(E_s, E)N(E)dE \quad (9)$$

Минимизация функционала А.Н. Тихонова проводилась при помощи метода проекций сопряженных градиентов.

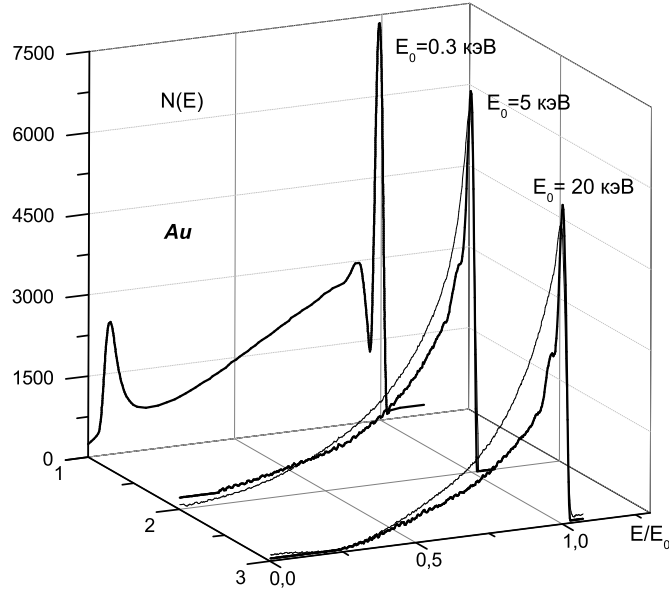


Рис. 3. Спектр электронов, отраженных массивным золотым образцом (тонкая кривая) и результат его реконструкции (утолщенная кривая). $E_0 = 0.3, 5$ и 20 кэВ; Число итераций - 150 ; размерность сетки $N = 500$; Параметр регуляризации $\alpha = 10^{-3}$. Спектр, снятый при энергии $E_0 = 0.3$ кэВ в реконструкции не нуждается.

На рис. 3 представлены экспериментально полученные при различных энергиях E_0 энергетические спектры электронов, отраженных массивным слоем золота (Au) (тонкие линии) и результаты их восстановления при помощи алгоритма, описанного выше.

Двумерная задача реконструкции изображения.

Двумерная задача восстановления изображения описывается уравнением

$$u(\xi, \eta) = \iint_B k(\xi - x, \eta - y)z(x, y)dx dy \quad (10)$$

относительно $z(x, y)$ в прямоугольнике $B = [0, 1] \times [0, 1]$.

Для решения данного уравнения предлагаются три алгоритма: алгоритмы решения в пространстве $W_2^1(B)$ и на классе функций с ограниченной полной вариацией $VH(B)$ с использованием равномерных сеток, а также алгоритм решения в пространстве $W_2^1(B)$ с адаптацией

неравномерной сетки.

Решение в пространстве W_2^1 сводится к минимизации функционала А.Н. Тихонова вида

$$M^\alpha(z) = \|k * z - u\|_{L^2}^2 + \alpha \|z\|_{W_2^1}^2 \quad (11)$$

С учетом теоремы о свертке, а также свойств преобразования Фурье, последний функционал нетрудно проварьировать и получить для элемента $z_\alpha(x, y)$, на котором достигается минимум, выражение:

$$z_\alpha(x, y) = \iint_{\mathbb{R}^2} e^{-i(\lambda x + \nu y)} \frac{\hat{k}^*(\lambda, \nu) \hat{u}(\lambda, \nu)}{|\hat{k}(\lambda, \nu)|^2 + \alpha(1 + \lambda^2 + \nu^2)} d\lambda d\nu \quad (12)$$

Для решения задачи (10) в пространстве W_2^1 автором использовались два различных численных алгоритма:

1. Алгоритм решения на равномерных сетках. Данный алгоритм описан подробно для одномерного случая в работе *Тихонова А. Н., Гончарского А. В., Степанова В. В., Яголы А. Г.* "Численные методы решения некорректных задач". Алгоритм базируется на конечно-разностной аппроксимации выражения (12) с использованием равномерных сеток и быстрых бинарных алгоритмов прямого и обратного преобразования Фурье и показывает наилучшие результаты восстановления при слабом зашумлении и/или при слабой степени "размытия".
2. Итеративный адаптивный алгоритм решения на неравномерных сетках, уточняемых на каждой итерации с учетом особенностей решения и функционала А.Н. Тихонова для конкретной задачи. Данный алгоритм был разработан автором и базируется на конечно-элементной аппроксимации выражения (12) с использованием неравномерных сеток. Наилучшие результаты адаптивный метод показывает для задач с интенсивным зашумлением и/или размытием.

Решение на классе функций с ограниченной вариацией.

При резких скачках искомого решения уменьшение параметра регуляризации влечет за собой появление на реконструированном сигнале осциллирующей помехи, возрастающей с уменьшением параметра регуляризации, что происходит вследствие частотной фильтрации. Увеличение же параметра регуляризации при решении в пространстве

Соболева приводит к излишней "заглаженности" решения и, как следствие, к падению пространственного разрешения.

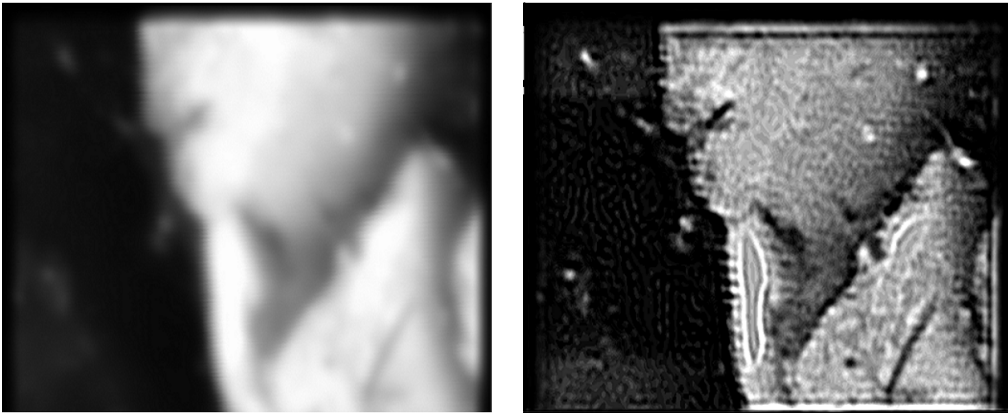
В реальных приложениях очень часто ситуация таких "скачков" в решении - в большинстве случаев реконструкция сигнала производится для более точного позиционирования границ раздела двух сред объекта и более точной детализации резких неоднородностей. Для преодоления этой трудности автором предложено применение к данной задаче метода решения задачи (10) на классе функций с ограниченной полной вариацией, разработанного проф. А.С. Леоновым.

При $z \in VH(B)$ функционал А.Н. Тихонова может быть записан в виде:

$$M_\alpha(z) = \|Az - u\|_{L^2}^2 + \alpha\Omega(z); \quad (13)$$

где

$$\Omega(z) = \|z\|_{VH} = \sup_S \left\{ \sum_{i=1}^N |z_{i+1} - z_{i1}| + \sum_{j=1}^M |z_{1j+1} - z_{1j}| + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |z_{i+1j+1} - z_{i+1j} - z_{ij+1} + z_{ij}| \right\} + |z(0,0)| \quad (14)$$



а)

б)

Рис. 4. Спайка в планарной микросхеме. а) исходное изображение, б) результат обработки. Сторона кадра - 20 мкм, заглубление - 0 нм, $r' = 0.23$ мкм. Разрешение цифрового изображения - 1 трх. Время обработки - 302 с., количество итераций - 80, первое приближение $z_0(x, y) = u(x, y)$.

Метод регуляризации, основанный на минимизации функционала (13) обеспечивает кусочно-равномерную сходимость приближенного решения к точному. Минимизация осуществлялась методом проекций сопряженных градиентов, для возможности реализации которого вме-

сто $\Omega(z)$ была введена его сглаженная "версия"

$$\hat{\Omega}^\varepsilon(z) = \sum_{i=0}^{N-2} \sum_{j=0}^{N-2} f_\varepsilon(z_{i+1j+1} - z_{ij+1} - z_{i+1j} + z_{ij});$$

$$f_\varepsilon(t) = \sqrt{t^2 + \left(\frac{\varepsilon}{N^2}\right)^2} \quad (15)$$

для которой справедлива оценка

$$0 \leq \hat{\Omega}^\varepsilon(z) - \Omega(z) \leq \varepsilon$$

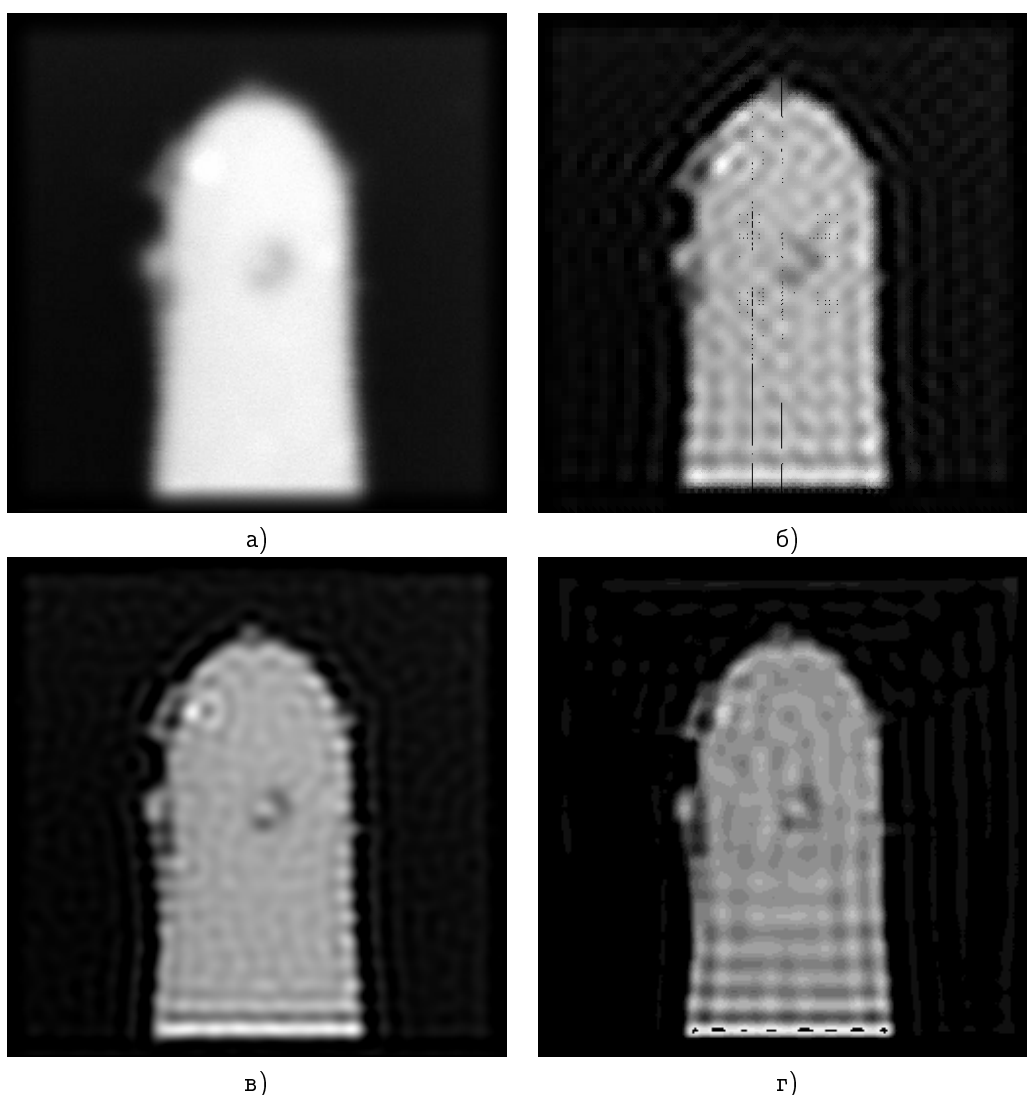


Рис. 5. Сравнение методов на примере восстановления реального изображения. а) исходное изображение б) результат восстановления с применением адаптивного алгоритма; в) решение на W_2^1 на равномерной сетке; г) решение на классе функций с ограниченной полной вариацией.

На рис. 4 - результат восстановления изображения спайки в пла-

нарной микросхеме с первым приближением в виде правой части $u(\xi, \eta)$.

На рис. 5 представлено полученное экспериментально изображение фрагмента планарной микросхемы и результаты его обработки с использованием различных методов.

Также в Главе 2 проведен сравнительный анализ устойчивости решения в зависимости от различных параметров задачи: зашумления и степени "размытия".

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приведено описание программного комплекса и его реализации. Детально рассмотрена реализация предложенных в Главе 2 алгоритмов численного решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода в пространствах W_2^1 и VH на равномерных и неравномерных сетках. Алгоритмы решения на равномерных сетках основаны на методе конечных разностей и используют алгоритм БПФ (быстрое преобразование Фурье); адаптивный алгоритм базируется на методе конечных элементов. Рассмотрены особенности численной реализации каждого алгоритма. Для адаптивного алгоритма предложен механизм оптимизации интерполяции сеточной функции с одной сетки на другую. Приведены примеры использования программного комплекса для решения других задач, таких как: задача восстановления границ неоднородностей, размытых в результате диффузии; задача восстановления дефокусированных цифровых фотографий.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приводятся выводы и рекомендации по применению результатов. Приведены основные выводы:

1. На экспериментальной основе произведен выбор адекватной модели искажения двумерного изображения и определена аппаратная функция преобразования сигнала.
2. Экспериментально определена аппаратная функция тороидального спектрометра. Поставлена и решена задача восстановления истинного энергетического спектра отраженных электронов. Впервые разрешены пики упруго отраженных электронов.
3. Представлены адаптированные к задаче микротомографии алгоритмы решения интегрального уравнения Фредгольма I-го рода, а также разработаны некоторые новые алгоритмы.
4. Предложены и реализованы в виде комплекса программ алгоритмы

решения обратных задач, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма 1-го рода.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих изданиях

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

- [1] Ягола А.Г., Кошев Н.А. Восстановление смазанных и дефокусированных цветных изображений. // Вычислительные методы и программирование. 2008. 9. 207-212.
- [2] Кошев Н.А., Орликовский Н.А., Рау Э.И., Ягола А.Г. Решение обратной задачи восстановления сигнала электронного микроскопа в режиме отраженных электронов на множестве функций ограниченной вариации. // Вычислительные методы и программирование. 2011. 12. 362-367.
- [3] Кошев Н.А., Лукьянов Ф.А., Рау Э.И., Сеннов Р.А., Ягола А.Г. Повышение пространственного разрешения в режиме отраженных электронов в сканирующей электронной микроскопии. // Известия РАН, серия Физическая. 2011. 75, № 9. 1248–1251.

Публикации в других научных изданиях:

- [4] С.И. Зайцев, Н.А. Кошев, Ф.А. Лукьянов, Э.И. Рау, Е.Б. Якимов. Прямое измерение диаметра и распределения плотности тока в кроссовере электронного зонда. // Сб.тез.докладов: XXIII Российская конференция по электронной микроскопии. 2010. 103-104.