

На правах рукописи



Грязев Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В
ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИН НАНОПОКРЫТИЙ
МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Специальность 05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена на кафедре Общей физики и ядерного синтеза Национального Исследовательского Университета «МЭИ».

Научный руководитель: **Афанасьев Виктор Петрович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор Национального Исследовательского
Университета «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Борисов Анатолий Михайлович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор Московского Авиационного Института
(Национального Исследовательского Университета)

Мартыненко Юрий Владимирович,
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник,
главный научный сотрудник Национального
Исследовательского Центра «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова

Защита состоится «___» _____ 2017 г. на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте РАН по адресу: 117218, Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36, к. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.204.01
к.ф.-м.н.



Вьюрков В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Проблемы анализа локального состава, структуры и физико-химических свойств поверхности приобрели совершенно особое значение с развитием твердотельной электроники и оптоэлектроники.

Базой технологического прогресса являются инструменты и приборы, позволяющие дать подробное и точное представление о явлениях, сопровождающих процесс обработки и модификации материалов, с целью придания им необходимых свойств. Одним из наиболее востребованных методов анализа образцов является электронная спектроскопия, позволяющая, не разрушая образец, получить о нём всю необходимую информацию. Для выполнения качественного и количественного анализа образцов созданы такие методики, как: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (ХПЭ), спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (СПУЭ), спектроскопия отраженных электронов (СОЭ) и т.д. Последние годы ознаменовались быстрым развитием технической, элементной базы электронной спектроскопии. Существующие в настоящее время серийно-выпускаемые энергоанализаторы обладают энергетическим разрешением порядка 50 мэВ, а в определённых случаях разрешение может достигать 5 мэВ. Величина $\Delta E/E$ составляет порядка 10^{-5} в широком диапазоне энергий электронов от 100 эВ до 50 кэВ. Для стандартных рентгеновских источников полуширина линии немонахроматического излучения Mg K α составляет 900 мэВ, для монохроматического излучения Al K α – 300 мэВ. Существует возможность использовать и синхротронное излучение с полушириной менее 50 мэВ. Одновременно с этим, установки позволяют снимать спектры без вращения образца в диапазоне углов визирования $\pm 35^\circ$. Такое развитие технологической базы приводит к получению большего объёма данных и, как следствие, наблюдению более тонких эффектов в сигналах электронной спектроскопии. На фоне возможностей, которыми располагает современная экспериментальная база электронной спектроскопии, особо заметно отставание созданных в 80-е годы прошлого века методик расшифровки сигналов электронной спектроскопии с целью получения информации об исследуемом объекте. В основе существующих методик обработки таких сигналов лежит подход, полностью пренебрегающий процессами упругого рассеяния, учёт которых ведётся за счёт введения поправочных коэффициентов. Традиционные методы базируются только на анализе пиков, сформированных электронами, не испытавшими неупругих рассеяний (т.н. Peak Shape Analysis – PSA). Поскольку задачи анализа мишеней на основе расшифровки сигналов электронной спектроскопии относятся к некорректным задачам математической физики, необходимо помнить о возможности получения, например, множества послынных профилей, соответствующих данной интенсивности фотоэлектронных линий в РФЭС. Из вышеотмеченного следует актуальность создания методов анализа объектов на основе данных электронной спектроскопии с использованием современных методов теории переноса частиц и излучений, основанных на последовательном решении обратных задач.

Неразрушающие методы послынного анализа с использованием электронной спектроскопии основаны на измерениях посредством применения энергетического сканирования об-

разца; на измерениях, выполненных с угловым разрешением; на измерениях широкого энергетического интервала спектра (в отличие от PSA) и на их последующем анализе. Процесс расшифровки таких сигналов, построенный на базе современных физических и математических моделей, последовательно учитывающих процессы многократного упругого и неупругого рассеяния, позволит увеличить глубину анализа, ограниченную в существующих методиках средней длиной пробега электрона между неупругими рассеяниями.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка методики качественного и количественного анализа сигналов электронной спектроскопии, полученных от различных мишеней, для определения распределения материалов в исследуемых образцах.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

1. развитие модели формирования угловых и энергетических распределений в электронной спектроскопии: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронной Оже-спектроскопии при рентгеновском зондировании, спектроскопии характеристических потерь энергии электронами в геометрии «на отражение» и «на прострел», спектроскопии отражённых электронов, спектроскопии пиков упруго отраженных электронов;
2. развитие методов решения обратных задач электронной спектроскопии для определения характеристик исследуемых твердотельных образцов и исследование элементарных процессов рассеяния электронов в твёрдых телах;
3. создание методов восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твёрдых телах из спектров РФЭС, развитие методов восстановления сечений неупругого рассеяния из ХПЭ спектров и на основе одновременного использования РФЭС и ХПЭ спектров;
4. восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния на основе экспериментальных данных, полученных при различных энергиях зондирования образцов и геометриях экспериментов;
5. разработка метода определения послойных профилей многослойных структур.

Основные положения, выносимые на защиту, и научная новизна

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Развита методика восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твердых телах из экспериментальных данных; установлено, что наиболее эффективным и корректным с физической точки зрения методом восстановления сечений является метод подбора (фитинг).
2. Установлена необходимость рассмотрения нескольких приповерхностных слоев, в которых процессы возбуждения плазменных колебаний с различными характерными частотами (наблюдаемых на экспериментальных спектрах ХПЭ, РФЭС) независимы, а каждая частота соответствует своему геометрическому размеру области.

3. Установлена независимость вида восстанавливаемых дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов от геометрии эксперимента.
4. Установлена возможность применения метода парциальных интенсивностей для представления энергетических спектров РФЭС, ЭОС, ХПЭ на основе единого подхода к описанию переноса электронов в веществе, используя одинаковые дифференциальные сечения неупругого рассеяния в соответствующих геометрических областях образцов.
5. Реализованы вычислительные методы, позволяющие повысить пространственное разрешение послойного анализа в СОЭ. Развита теория описания энергетических спектров электронов, отраженных от слоисто неоднородных мишеней.

Практическая значимость диссертационной работы

- Разработана методика получения дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твердых телах методом фитинга. Практическая ценность методики восстановления сечений из спектров характеристических потерь энергии электронами ограничена небольшим несистематизированным набором экспериментальных данных.
- Показана возможность использования реализованной методики для восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из экспериментальных спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии как однокомпонентных веществ, так и оксидов, нитридов и других химических соединений, систематизированных в различных справочниках.
- Используя метод парциальных интенсивностей, дано описание спектров электронной спектроскопии в едином подходе. Продемонстрировано, что последовательный учет процессов многократного рассеяния при описании сигналов характеристических потерь энергии электронами и рентгеновской фотоэлектронной эмиссии позволяет применять данный подход без привлечения дополнительных корректирующих величин.
- Получены и апробированы дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов для набора элементов (Be, Al, Mg, Si, Nb, W) при различных энергиях, а также для некоторых соединений (CH_x , SiO_x).
- Усовершенствована методика расчета спектров СОЭ, позволяющая повысить точность описания энергетических спектров отраженных электронов.
- В рамках используемого подхода к описанию энергетических электронных спектров предложено развитие положения теории Р. Ритчи (R.H. Ritchie) о количестве и размерах приповерхностных областей, имеющих различные плазмонные (резонансные) частоты и, как следствие, различные законы потерь энергии в этих областях. в хендбуках.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается математической строгостью методов решения прямых задач, удовлетворительным соответствием рассчитанных спектров

различных типов спектроскопии (РФЭС, ХПЭ) с использованием восстановленных сечений с экспериментальными данными различных научных групп, а также сравнение сечений с результатами, полученными другими исследователями: В. Вернер (W.S.M. Werner), С. Тугаард (S. Tougaard). Полученные в работе численные значения толщин слоёв, относительных концентраций хорошо согласуются с результатами различных исследований иными методами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 работах в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе: «Vacuum», «Journal of Vacuum Science and Technology B», «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» / «Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques», «Ядерная физика и инжиниринг», «Journal of Physics: Conference Series», IEEE. Научные результаты и материалы исследований докладывались и были опубликованы в материалах и сборниках тезисов российских и международных конференциях, в том числе:

- IX, X, XI, XIII Курчатовская молодёжная научная школа (2011, 2012, 2013, 2015 гг.);
- XVIII, XIX, XX, XXI, XXII, XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.);
- Национальная конференция «Повышение эффективности, надёжности и безопасности работы энергетического оборудования ТЭС и АЭС» (2012 г.);
- XXXVIII, XXXIX, XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (2012, 2013, 2016 гг.);
- XI, XII Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (2012, 2013 г.); XIII, XIV Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (2014, 2016 гг.);
- XLIV, XLV, XLVI Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (2014, 2015, 2016 гг.);
- X International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) and II International Conference on Emission Electronics (ICEE) (2014 г.);
- XXII Международная конференция «Взаимодействию ионов с поверхностью» (2015 г.);
- XIX, XX Конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (2016, 2017 гг.);
- Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2016», XXIII Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (2016 г.);
- 14th International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD) (2016 г.);
- International Conference “Micro- and Nanoelectronics” (ICMNE) (2016 г.).

Личный вклад. Материалы и результаты диссертационного исследования получены соискателем лично или с соавторами. Личный вклад автора для достижения полученных результатов носит определяющий характер и заключается в получении и обобщении данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния электронов в твердых телах, усовершенствовании методики восстановления сечений неупругого рассеяния. Созданный в диссертационной работе метод анализа слоисто неоднородных мишеней включает следующие этапы: 1) восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов, 2) верификацию полученных сечений на основе спектров ХПЭ и РФЭС, 3) анализ исследуемых образцов на основе многократного решения прямых задач (фитинга). Разработанные подходы были применены для описания различных электронных спектров (ХПЭ, РФЭС, ЭОС, СПУЭ, СОЭ), а также для анализа различных образцов.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из **введения, четырёх глав и заключения**. Полный объём диссертации составляет 91 страницу с 50 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 115 наименований.

Содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности темы представленной работы, сформулированы цели исследования, показана новизна и значимость работы, изложены выносимые на защиту положения, а также приведены сведения об апробации работы.

В **главе 1** дается обзор современных методов анализа поверхности. Приведены существующие подходы к послойному анализу поверхности как разрушающими методами, так и методами электронной спектроскопии. Основной акцент сделан на наиболее популярном методе неразрушающего анализа – рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Также рассмотрены методы восстановления из экспериментальных данных одной из важнейших рассеивающих характеристик среды – дифференциальных по энергиям (по потерям энергии Δ) сечений однократного неупругого рассеяния электронов. В настоящий момент существуют две основные модели восстановления таких сечений, помимо используемой в данной работе. В модели С. Тугаарда [1] пренебрегается различием сечений в приповерхностных слоях и однородном массиве мишени даже для спектров, снятых с высоким энергетическим разрешением. Выполнение данной процедуры приводит к появлению отрицательных, не имеющих физического смысла областей в сечении, а также возникает много особенностей, не находящихся однозначной физической трактовки. В работе В. Вернера [2] в развитие идей [1] создается методика, использующая два спектра ХПЭ, измеренных в различных геометриях, и позволяющая восстанавливать сечения для двух областей. Но методика [2] имеет низкую обусловленность.

В **главе 2** развивается методика расчёта энергетических спектров электронов, отражённых, прошедших сквозь слой, эмитированных слоями конечной толщины. Граничная задача для

уравнения переноса решается с использованием метода инвариантного погружения. Приведены алгоритмы расчёта энергетических спектров ХПЭ, РФЭС и ЭОС многослойных систем.

Энергетический спектр представляется функциями: $Q(z, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ описывает плотность потока фотоэлектронов, $A(z, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ – плотность потока Оже-электронов, $R(z, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ – плотность потока отраженных электронов и $T(z, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ – плотность потока электронов, прошедших сквозь слой толщиной z . Все эти функции ($S = R, T, Q, A$) представляем в виде разложения их в ряд по кратностям неупругого рассеяния (т.н. метод парциальных интенсивностей [3]):

$$S(\tau, \Delta, \mu_0, \mu, \varphi) = S_0(\tau, \mu_0, \mu, \varphi) \delta(\Delta) + \sum_{k=1}^{\infty} S_k(\tau, \mu_0, \mu, \varphi) x_{in}^k(\Delta) \quad (1)$$

где $\tau = z/l_{tot} = z(\sigma_{in} + \sigma_{el})n$ – безразмерная толщина слоя; σ_{el}, σ_{in} – интегральные сечения упругого и неупругого рассеяния электрона, соответственно, n – концентрация атомов в слое; коэффициенты $S_k(\tau, \mu_0, \mu, \varphi)$ определяются путём численного решения уравнения переноса электронов, получаемых с использованием метода инвариантного погружения (подробно процесс вычисления коэффициентов S_k приведён в [4–6]); $\omega_{in}(\Delta) = x_{in}(\Delta) \cdot \sigma_{in}$ – дифференциальное сечение однократного неупругого рассеяния электронов, которое определяет вероятность потери энергии $\Delta = E_0 - E$ после акта однократного неупругого рассеяния,

$$\int_0^{E_0} x_{in}(\Delta) d\Delta = 1, \quad x_{in}^1(\Delta) = x_{in}(\Delta); \quad x_{in}^k(\Delta) = \int_0^{\Delta} x_{in}^{k-1}(\Delta - \varepsilon) x_{in}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

$x_{in}^k(\Delta)$ – k -кратная свёртка нормированного на единицу сечения неупругого рассеяния $x_{in}(\Delta)$, определяющая вероятность потери энергии Δ после k последовательных актов неупругого рассеяния.

В работе использованы численные методы решения систем уравнений [5], полученных с использованием метода инвариантного погружения, для определения функций $S_k(\tau, \mu_0, \mu, \varphi)$, позволившие найти решение граничной задачи для уравнения переноса с любой наперед заданной точностью, величина которой лимитируется погрешностями дифференциального сечения упругого рассеяния [7] и погрешностью альbedo для однократного рассеяния $\lambda = \sigma_{el}/(\sigma_{el} + \sigma_{in})$ [8, 9], которые зависят только от материала образца.

Вычисления спектров характеристических потерь энергии электронами (ХПЭ) от двухслойных систем при условии, что необходимые функции для каждого слоя уже рассчитаны по формуле (1), выполняются на основе формулы, вид которой следует из рис. 1, а:

$$R_{BS} \simeq R_S + T_S \times R_B \times T_S \quad (3)$$

где

$$T_S \times R_B = \int_0^{\Delta} \int_0^{2\pi} \int_0^1 T_S(\tau_S, \Delta - \varepsilon, \mu_0, \mu', \varphi') \cdot R_B(\tau_S, \varepsilon, \mu', \mu'', \varphi'' - \varphi') \frac{d\mu'}{\mu'} d\varphi' d\varepsilon \quad (4)$$

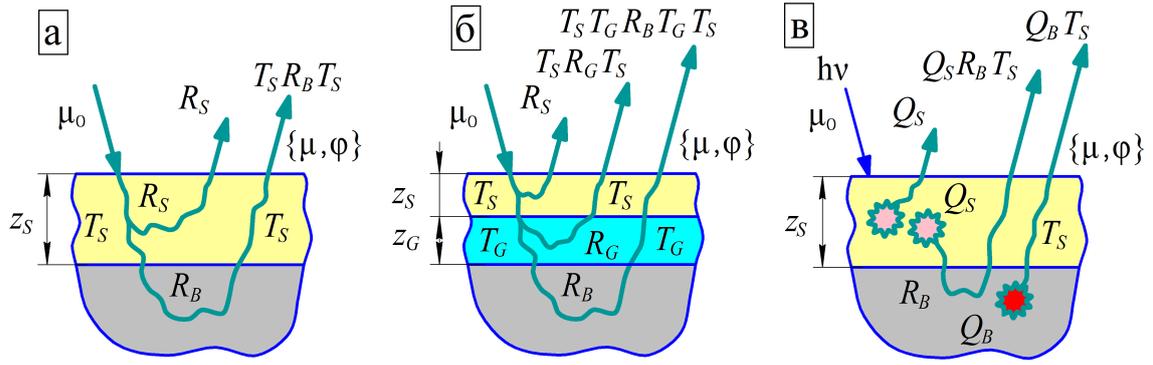


Рис. 1: Модели формирования спектров: а) двухслойная и б) трёхслойная для ХПЭ отраженных электронов; в) двухслойная для РФЭС.

Вычисления энергетического спектра ХПЭ от трёхслойной модели мишени ведется на основе формулы следующей из рис. 1, б):

$$R_{BGS} \simeq R_S + T_S \times R_G \times T_S + T_S \times T_G \times R_B \times T_G \times T_S \quad (5)$$

Вычисления спектров РФЭС и ЭОС в двухслойной модели мишени проводятся, согласно схеме процесса, представленной на рис. 1, в):

$$Q_{BS} \simeq Q_S + Q_B \times T_S + Q_S \times R_B \times T_S \quad (6)$$

В главе 3 описывается основная характеристика рассеивающей среды – дифференциальное сечение неупругого рассеяния электронов $x_{in}(\Delta)$, а также процедура восстановления сечений в однородном удалённом от поверхности массиве твёрдого тела и приповерхностной области на примере спектров ХПЭ, РФЭС.

Основными механизмами потерь энергии электронов в твёрдом теле являются локальные потери энергии на ионизацию и межзонные переходы, а также нелокальные потери энергии на возбуждение ленгмюровских колебаний [10, 11]. Из этого следует, что дифференциальные сечения неупругого рассеяния $x_{in}(\Delta)$ допускают представление в виде:

$$x_{in}(\Delta) = \sum_{i=1}^{N_{pl}} \lambda_{pl\ i} x_{pl\ i}(\Delta) + \sum_{j=1}^{N_{ion}} \lambda_{ion\ j} x_{ion\ j}(\Delta), \quad (7)$$

Вид функции потерь энергии электроном на возбуждение плазменных колебаний может быть представлен в виде [11]:

$$x_{pl}(\Delta) = A_{pl} \frac{\Delta^\beta}{(\epsilon_{pl}^2 - \Delta^2)^2 + \Delta^\alpha b^{4-\alpha}}, \quad (8)$$

где ϵ_{pl} – параметр, отвечающий за положение плазмонного пика, b – параметр затухания плазмона, определяющий «полуширину» плазмонного пика, α и β – параметры, отвечающие за асимметрию плазмонного пика.

Также существует возможность представить $x_{pl}(\Delta)$ в модифицированном варианте формулы (8):

$$x_{pl}(\Delta) = A_{pl} \int_{K^-}^{K^+} \frac{\Delta^\beta}{\left((\epsilon_{pl} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m})^2 - \Delta^2 \right)^2 + \Delta^\alpha b^{4-\alpha}} \frac{dk}{k}, \quad (9)$$

$$K^\pm = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \left(\sqrt{E_0} \pm \sqrt{E_0 - \Delta} \right),$$

которая позволяет более тонко подбирать форму дифференциального сечения неупругого рассеяния.

Сечение ионизации описывается формулой Томсона с учетом экранирования [12]:

$$x_{ion j}(\Delta) = \frac{A_{ion j}}{\Delta^{2+a_j}} \eta(\Delta - J_{ion j}) \quad (10)$$

где $J_{ion j}$ – пороги ионизации, a_j – параметр экранирования, $\eta(\Delta - J_{ion j})$ – ступенчатая функция Хевисайда, коэффициенты $A_{pl i}$ и $A_{ion j}$ находятся из условий нормировки:

$$\int_0^{E_0} x_{pl i}(\Delta) d\Delta = 1; \quad \int_0^{E_0} x_{ion j}(\Delta) d\Delta = 1$$

Коэффициенты λ_{pl} и λ_{ion} показывают вклад соответствующих процессов. Для соблюдения условия нормировки сечения неупругого рассеяния, уравнение (2), необходимо, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^{N_{pl}} \lambda_{pl i} + \sum_{j=1}^{N_{ion}} \lambda_{ion j} = 1$$

В вышеприведённых формулах величины $\lambda_{pl i}$, $\epsilon_{pl i}$, $b_{i,\alpha}$, β , $\lambda_{ion j}$, a_j являются подгонными параметрами, восстанавливаемыми в процессе процедуры подбора.

В данной главе приведены результаты выполнения процедуры восстановления сечений $x_{in}(\Delta)$ как в двухслойной, так и в трёхслойной моделях. Процедура восстановления заключается в многократном решении прямой задачи с варьируемыми подгонными параметрами. Итогом процедуры подбора является минимизация функционала:

$$\zeta = \int_0^{\Delta_{max}} |S_{exp}(\Delta, \mu_0, \mu, \varphi) - S_{fit}(\Delta, \mu_0, \mu, \varphi)| d\Delta, \quad (11)$$

где $S_{exp}(\Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ – экспериментальный спектр, $S_{fit}(\Delta, \mu_0, \mu, \varphi)$ – расчётный спектр с учётом аппаратной функции энергоанализатора, доплеровским уширением, а для спектров РФЭС – ещё и с учётом асимметричности вида фотоэлектронной линии [13]. Апробация сечений $x_{in}(\Delta)$ проводится на основе подстановки соответствующего сечения восстановленного из экспериментального спектра ХПЭ в формулы для расчёта экспериментального спектра РФЭС и наоборот.

Результаты расчета спектра ХПЭ Mg представлены на рис. 2, а. На рис. 2, б приведены восстановленные сечения $x_{inB}(\Delta)$ и $x_{inS}(\Delta)$ для образца Mg. Проведём расчёт для спектра РФЭС Mg в двухслойной модели (рис. 1, в), экспериментальные данные по которому приведены

в справочнике (*Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy* – [14]). Т.к. спектр РФЭС в рассматриваемой области энергий ($E \approx 1320 - 1440$ эВ) имеет три фотоэлектронные линии: $2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$, $2p_{3/2}$, то в рамках решения прямой задачи каждая из них вычисляется в соответствии с уравнениями (1), (6), используя полученные дифференциальные сечения неупруго рассеяния (рис. 2, б). Результат расчёта спектра РФЭС Mg, представленный на рис. 3, а, указывает на актуальность сечений $x_{inB}(\Delta)$ и $x_{inS}(\Delta)$ для образца Mg.

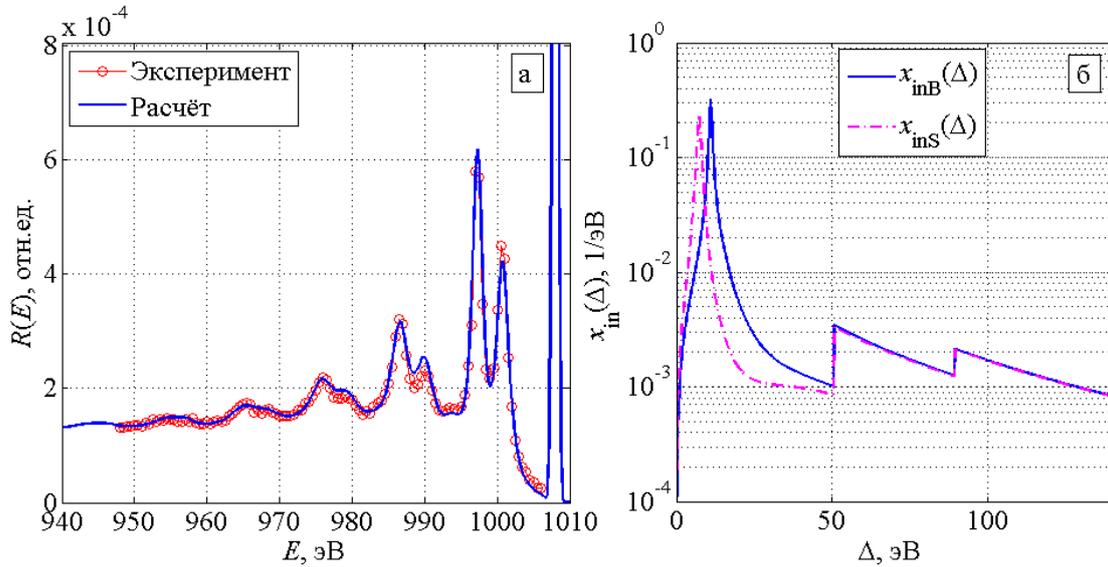


Рис. 2: Результат процедуры фитинга с использованием двухслойной модели (рис. 1, а).
 а) Спектр ХПЭ в магнии Mg ($E_0 = 1008$ эВ, эксперимент – [15]). б) Восстановленные сечения неупругого рассеяния электронов в магнии Mg.

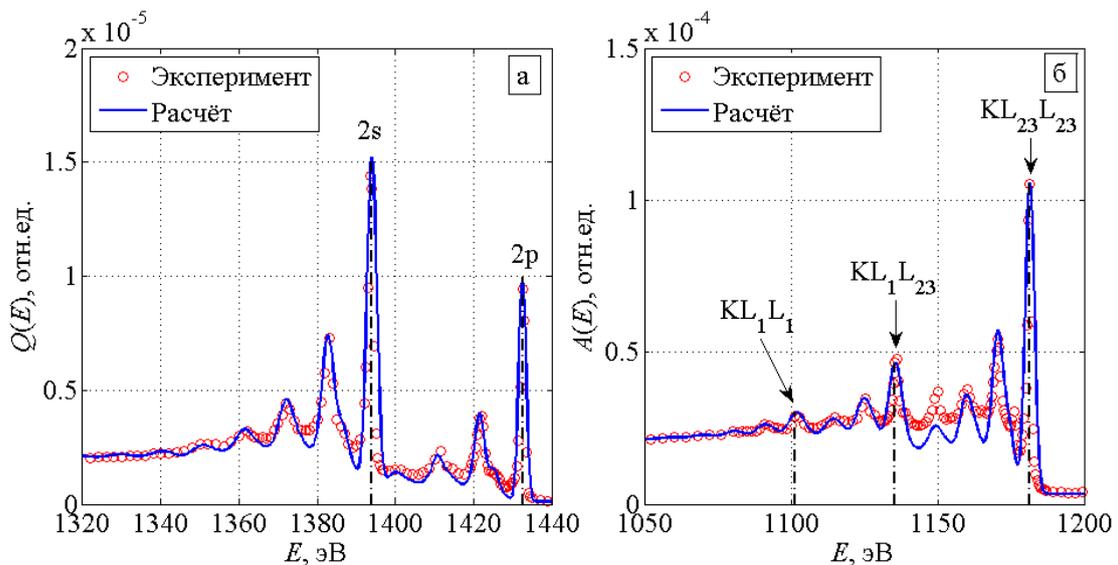


Рис. 3: Электронные спектры (а – РФЭС, б – ЭОС), полученные при рентгеновском зондировании (монохроматическое излучение линии Al K_{α}) образца Mg. Эксперимент – [14].

Проведён аналогичный расчёт и для электронного Оже-спектра (ЭОС), полученного при облучении образца Mg излучением линии Al K_{α} , прошедшим через монохроматор. Со-

ответствующее уравнение расчёта двухслойной системы в случае ЭОС аналогично уравнению (6). После этого рассчитан Оже-спектр Mg KLL, который образуется из трёх Оже-линий: KL_1L_1 , KL_1L_{23} , $KL_{23}L_{23}$. Результаты представлены на рис. 3, б, на котором видно, что в данной области энергий присутствует дополнительный пик, который необходимо принять во внимание.

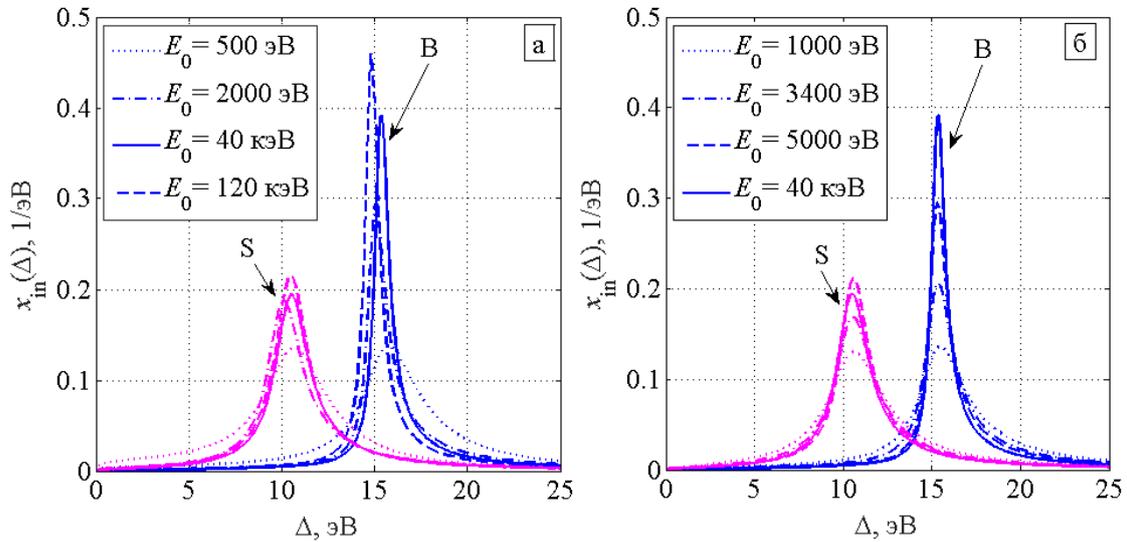


Рис. 4: Восстановленные дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов в Al $x_{in}(\Delta)$ для однородного массива мишени (B) и приповерхностного слоя (S) при различной энергии зондирующего пучка E_0 .

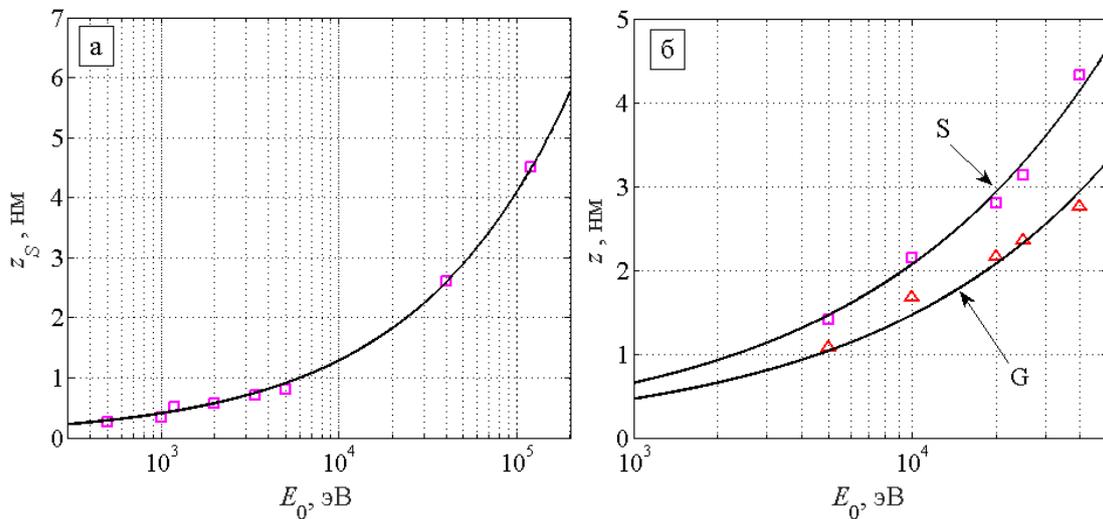


Рис. 5: Зависимость толщин приповерхностных слоёв z от энергии E_0 для Al (a) и Nb (б). Символы – результат процедуры фитинга, сплошная линия – зависимость $z_S \sim \sqrt{E_0}$.

Далее представлен результат восстановления сечений неупругого рассеяния электронов в Al при разных энергиях зондирующего пучка электронов E_0 : от 500 эВ до 120 кэВ. В двухслойной модели (рис. 1, а) были восстановлены сечения $x_{inB}(\Delta)$, $x_{inS}(\Delta)$ в Al. Экспериментальные спектры представляют как спектры отражённых электронов ($E_0 = 0,5 - 40$ кэВ),

так и спектр прошедших сквозь слой электронов ($E_0 = 120$ кэВ). Результаты процедуры фитинга представлены на рис. 4 (соответствующие сечения $x_{in}(\Delta)$) и на рис. 5, а (зависимость толщины приповерхностного слоя от энергии электронов).

Следует отметить, что для энергии зондирующего пучка $E_0 = 5$ кэВ имелось два спектра ХПЭ, снятых в разной геометрии: а) $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, б) $\theta_0 = 67,5^\circ$, $\theta = 67,5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Применение подхода, используемого в данной диссертационной работе, позволило установить, что дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов в однородном массиве мишени $x_{inB}(\Delta)$ и в приповерхностной области $x_{inS}(\Delta)$, а также толщина приповерхностного слоя не зависят от геометрии эксперимента. Анализ набора сечений, представленных на рис. 4, б, позволяет сделать выводы: 1) положение максимумов в сечениях практически не меняется с ростом энергии. Это физически понятный результат, поскольку положение максимума определяется ленгмюровской (плазменной) частотой, зависящей только от концентрации свободных электронов; 2) уменьшение полуширины на полувысоте можно объяснить замедлением процессов релаксации ленгмюровских колебаний с ростом энергии зондирующих электронов. Анализ набора сечений, представленных на рис. 4, а, показывает, что, к сожалению, говорить о закономерностях поведения сечений не представляется возможным. Наблюдается энергетическая зависимость положения максимума в сечениях каждого слоя, возникает немотонное поведение амплитуды и ширины данных пиков. Из этих результатов следует вывод: рекомендуется продолжить исследования по установлению закономерностей поведения дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов от энергии зондирующего пучка путём более аккуратного проведения новой серии экспериментов для чистого алюминиевого образца как при разных энергиях зондирующего пучка электронов, так и, желательно, при разных геометриях.

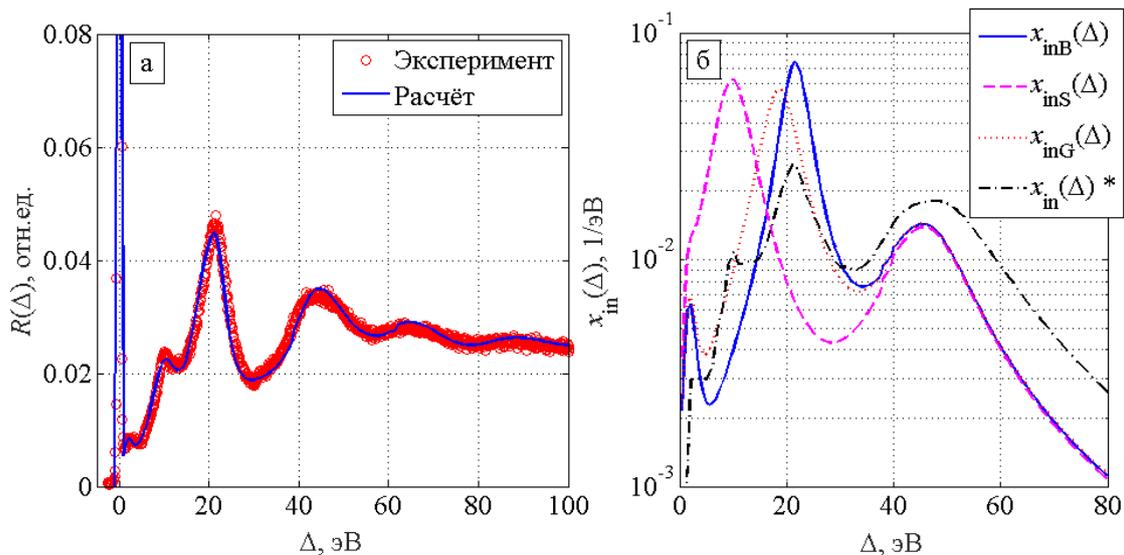


Рис. 6: Результат процедуры фитинга с использованием трёхслойной модели (рис. 1, б).

а) Спектр ХПЭ Nb ($E_0 = 5$ кэВ). б) Восстановленные сечения неупругого рассеяния электронов в Nb. Штрих-пунктирная линия – сечение $x_{in}(\Delta)$, определённое в однородной модели [16].

Для более адекватного описания процессов потерь энергии в ниобии Nb использовалась трёхслойная модель. Благодаря тому, что в распоряжении имеется набор спектров ХПЭ, измеренных в широком интервале энергий зондирующего пучка электронов $E_0 = 5 \div 40$ кэВ на одной экспериментальной установке, открылась возможность определения динамики изменения толщин z_S и z_G с изменением энергии зондирующего пучка. На рис. 6 представлены результаты фитинга, на основе которого получены сечения $x_{inB}(\Delta)$, $x_{inG}(\Delta)$, $x_{inS}(\Delta)$, приведённые на рис. 6, б. Вид сечений в каждом слое, практически не меняется с энергией. От энергии зависят лишь толщины приповерхностных слоёв z_S и z_G (рис. 5, б). Величины ионизационных вкладов $\lambda_{ion,j}$ для рассматриваемых порогов ($J_{ion} \approx 39, 62, 210, 367$ эВ) монотонно увеличивались на 1 – 1,5 % при увеличении энергии E_0 .

Восстанавливаемые в процессе фитинга дифференциальные сечения неупругого рассеяния в Nb представлены на рис. 6, б. В приповерхностных слоях наблюдаются два характерных пика потерь энергии на возбуждение плазменных колебаний: $\varepsilon_S = \hbar\omega_S$, $\varepsilon_G = \hbar\omega_G$. Наличие двух частот поверхностных плазмонов указывает, в соответствии с теорией Р. Ритчи [17], на существование двух характерных геометрических областей, в которых происходят соответствующие потери энергии. Толщина слоя z для каждого слоя соответствует $z_S \sim \frac{v_e}{\omega_S}$, $z_G \sim \frac{v_e}{\omega_G}$, где v_e – скорость электронов, соответствующая энергии падающего пучка электронов E_0 (для спектров ХПЭ), или энергии фотоэлектронной линии E_{shell} (для РФЭС спектров). Восстановленные сечения позволяют описать и спектр РФЭС Nb, с учётом зависимости, приведённой на рис. 5, б.

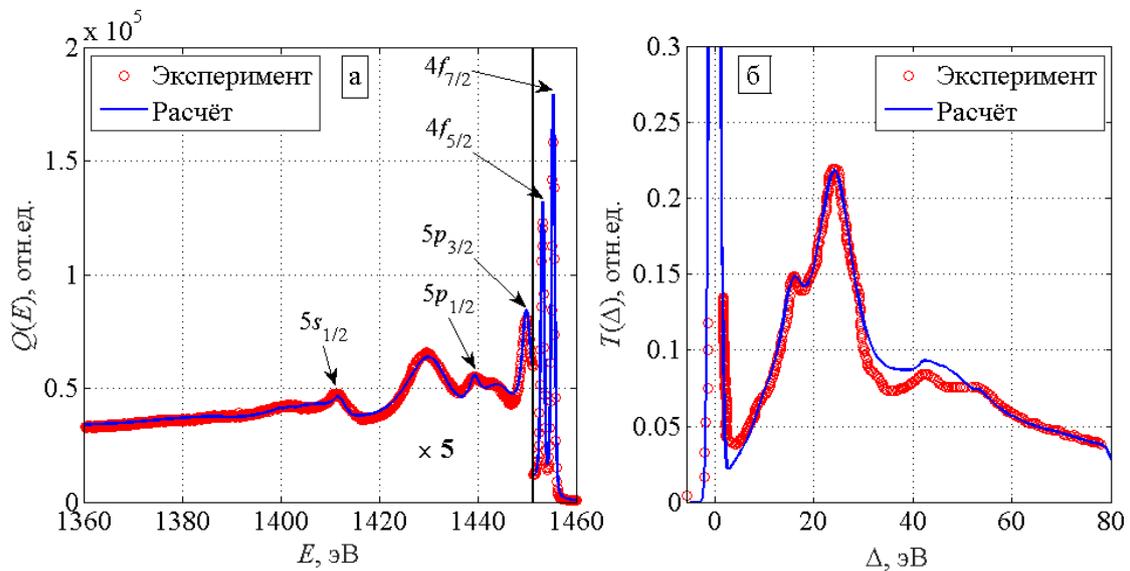


Рис. 7: Энергетические спектры W. а) Спектр РФЭС (рентгеновское зондирование монохроматическим излучением линии Al $K\alpha$; эксперимент – [14]). б) Спектр ХПЭ в геометрии на «прострел», наблюдаемый при зондировании W фольги толщиной 28 нм электронами с энергией 25 кэВ (визирование в направлении зонда; эксперимент – [18]).

Впервые была реализована методика восстановления сечений $x_{in}(\Delta)$ из спектров РФЭС. В данной главе она была применена для спектров РФЭС Ве и W. Результаты восстановления для спектра Ве представлены в [19]. На рис. 7, а наблюдается плохо читаемая область потерь энергии, примыкающая к $4f$ пикам, из-за наличия множества фотоэлектронных пиков

в анализируемой области спектра. В этом случае восстановление сечений велось в двухслойной модели мишени [6]. Так, например, в случае вольфрама, фотоэлектронный спектр которого индуцировался излучением $K\alpha$ линии Al, дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов определялись в результате процедуры подбора на энергетическом интервале 1360 – 1460 эВ. Указанный интервал РФЭС спектра сформирован за счет эмиссии фотоэлектронов с уровней $4f_{7/2}$, $4f_{5/2}$, $5p_{3/2}$, $5p_{1/2}$, $5s_{1/2}$ и представляет собой наложение большого количества сигналов. Отмеченное наложение сигналов приводит к затухиванию картины суммарного спектра, что позволяет представить его описание в более грубом, усредненном виде. Так, например, возможно описание РФЭС спектра W без выделения двух различных резонансов в приповерхностном слое. В то же время спектр ХПЭ, измеренный с высоким энергетическим разрешением, в приповерхностной области содержит два пика с энергиями: $\hbar\omega_S = 11,0$ эВ, $\hbar\omega_G = 15,8$ эВ, которые хорошо видны и в экспериментальном спектре (см. рис. 7, б), который представляет собой сигнал многократного рассеяния. Восстановление сечений $x_{in}(\Delta)$ из спектра ХПЭ проводилось в трёхслойной модели.

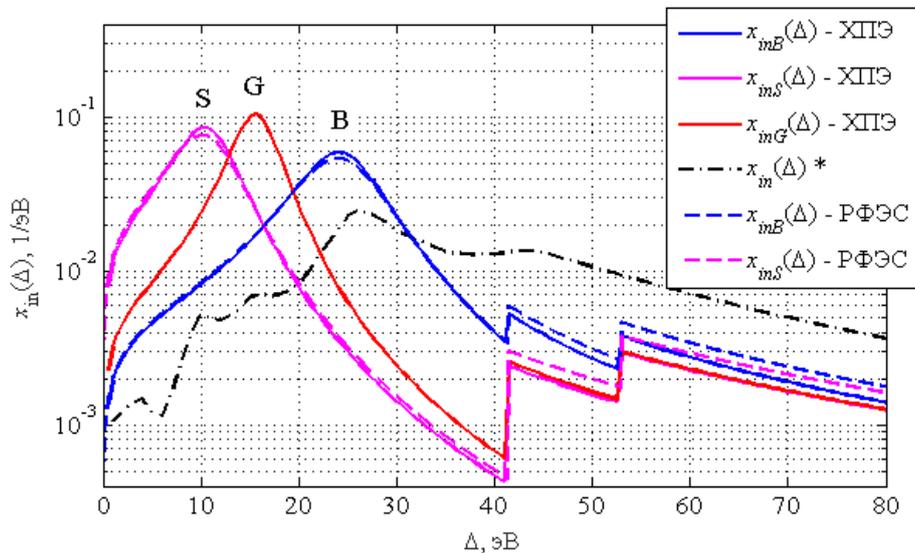


Рис. 8: Восстановленные дифференциальные сечения неупругого рассеяния в приповерхностных слоях (S и G) и однородном массиве мишени (B) при энергии $E_0 = 5$ кэВ. Сплошные линии – сечения, используемые для расчета спектра ХПЭ «на прострел» (рис. 7, б), штриховые линии – для спектра РФЭС (рис. 7, а), штрих-пунктирная линия – сечение $x_{in}(\Delta)$, определённое в однородной модели, согласно [16].

Сравнение сечений, которые получены В. Вернером [16], с результатами настоящей работы указывает на совпадение энергий как плазмонных возбуждений, так и ионизационных процессов. Но данные В. Вернера получены в однородной модели процессов потерь энергии и не учитывают различий в законах потерь энергии в поверхностных слоях и однородном массиве, не принимается во внимание и эффект энергетической зависимости относительных вкладов потерь в поверхностных слоях и массиве.

В главе 4 приводятся результаты анализа сигналов электронной спектроскопии. Представлена и реализована методика обработки спектра СПУЭ для углеводородного образца, по-

лучена величина относительной концентрации водорода. Применение разработанных методик позволило определить толщины слоёв для слоисто неоднородных образцов по спектрам РФЭС (SiO_x/Si , Au/Si) и по спектрам СОЭ (Nb/Si).

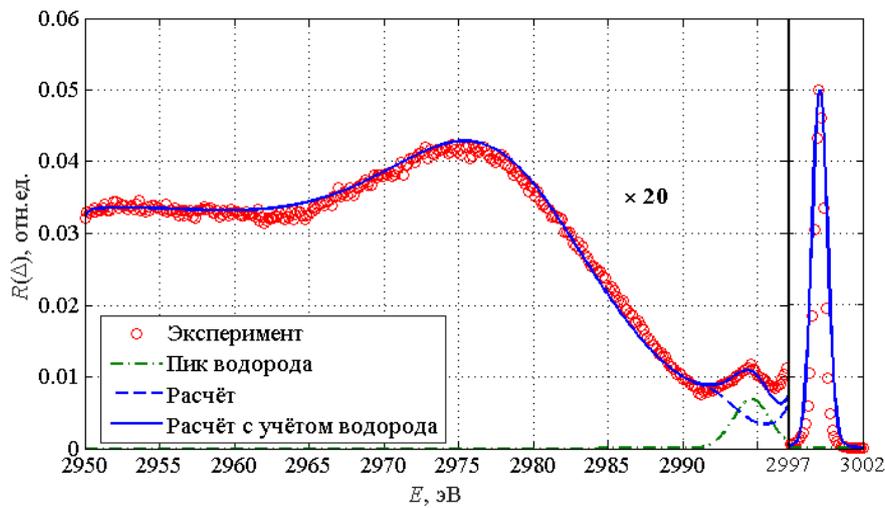


Рис. 9: Результаты анализа углеводородного образца. Спектр ХПЭ, $E_0 = 3$ кэВ.

Предложен метод расчёта сигнала, образованного неупруго рассеянными электронами, в области потерь энергии электронами при квазиупругих рассеяниях. Данный метод основан на совместной интерпретации спектров ХПЭ и РФЭС с использованием практически одинаковых сечений. Метод состоит из двух этапов. На первом этапе восстанавливаются дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов $x_{in}(\Delta)$ для конкретного образца из спектра РФЭС, а на втором этапе полученные сечения используются для расчёта сигнала многократно неупруго рассеянных электронов из спектров ХПЭ, чтобы корректно определить сигнал истинно упруго рассеянных электронов (рис. 9). В результате было получено, что относительная концентрация, усреднённая в приповерхностной области толщиной $l_{in} = 6,5$ нм, составила $n_H/n_C = 1,3$.

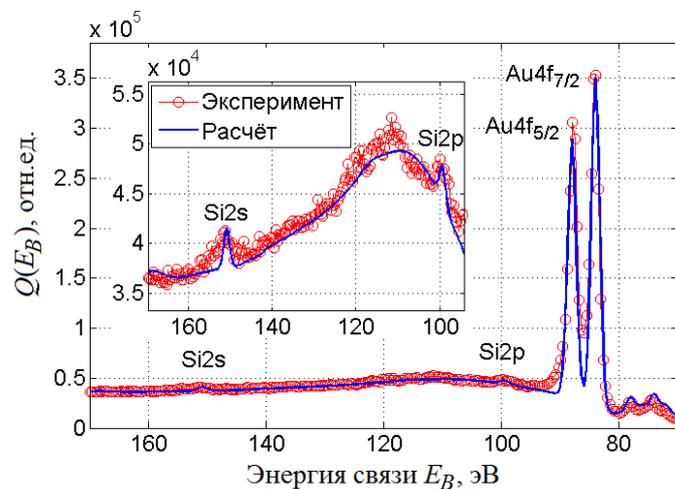


Рис. 10: Сравнение спектров РФЭС для образца напыленного золота на кремниевую подложку. Толщина слоя Au $z_{Au} = 0,74$ нм.

На примере нескольких образцов показана возможность применения методики, заключающейся в расчёте спектра с учётом многократных упругих и неупругих рассеяний, а также с учётом химсдвига в спектрах РФЭС. Один из образцов представлял собой слой Au, нанесённый методом плазменного осаждения на подложку из Si. Размеры толщин слоёв, которые можно определить по спектрам РФЭС, составляют от долей нанометров до примерно 10 нанометров.

Для проверки эффективности развитого метода определения толщин тонких плёнок напыленных слоёв Nb на подложке из Si (с различными временами напыления). Из спектров СОЭ (рис. 11) однородных образцов Si и Nb были восстановлены эффективные сечения неупругого рассеяния $x_{inSi}(\Delta)$, $x_{inNb}(\Delta)$ в однородной модели представления мишени (расчёт по формулам (7) и (10) с $N_{pl} = 0$ и $N_{ion} = 2$), т.к. энергетическое разрешение спектров составляло около 20 – 50 эВ. Эти сечения использовались для расчёта набора графиков с различными толщинами слоя Nb. Результаты расчёта представлены на рис. 11.

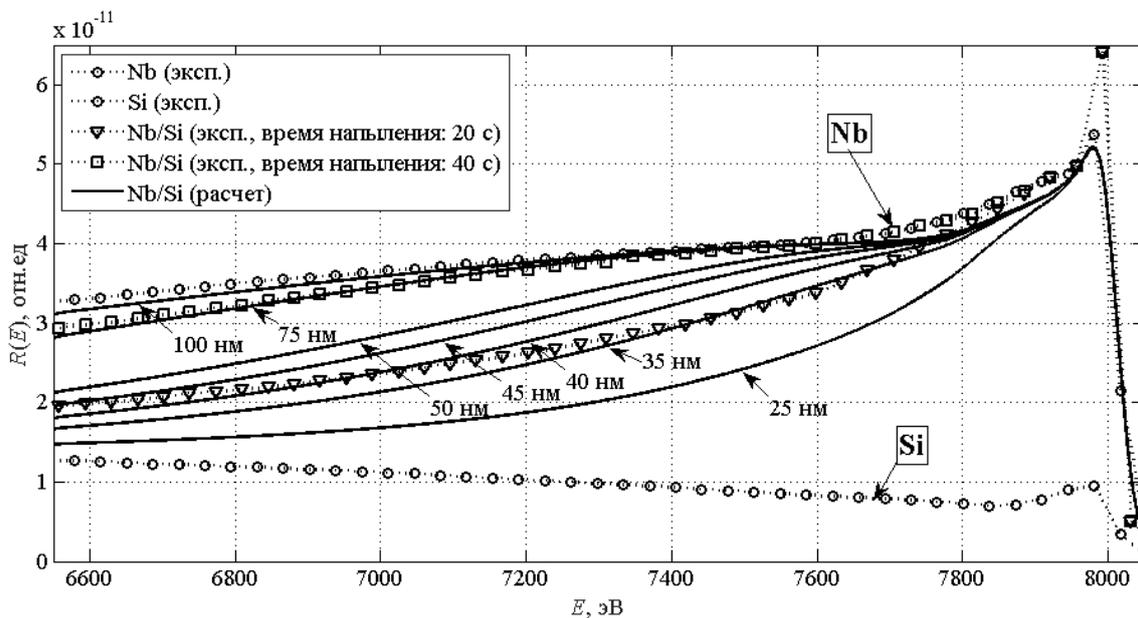


Рис. 11: Энергетические спектры электронов, отражённых от однородных мишеней Nb, Si и от неоднородных мишеней Nb/Si. Начальная энергия электронов $E_0 = 8$ кэВ.

Экспериментальные данные – [20].

Также для больших начальных энергий падающего пучка (8 и 16 кэВ) был применён модифицированный подход. Результаты определения толщин представлены в табл. 1. Полученные результаты удовлетворительно коррелируют с данными из [20]. Чтобы определить толщину слоя Nb, время напыления которого составило 60 с, понадобилось увеличить энергию зондирующего пучка электронов до 16 кэВ, т.к. величина, характеризующая глубину анализа в СОЭ, – это транспортная длина l_{tr} , которая для Nb при $E_0 = 8$ кэВ равна 70 нм, а при $E_0 = 16$ кэВ – 208 нм. С увеличением энергии увеличивается и глубина анализа, но в тоже самое время уменьшается точность определения толщин, зависящая от l_{tr} .

Таблица 1: Толщины слоёв ниобия Nb на подложке из кремния Si, полученные различными подходами.

Время напыления Nb на подложку Si, сек	Толщина слоя Nb, нм		
	расчёт, согласно рис. 11 $E_0 = 8$ кэВ	расчёт на основе модифицированного подхода	
		$E_0 = 8$ кэВ	$E_0 = 16$ кэВ
20	40 ± 5	38 ± 2	33 ± 6
40	75 ± 5	75 ± 5	70 ± 8
60	–	–	120 ± 15

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

- Выполнены расчёты спектров характеристических потерь энергии отражёнными и прошедшими слой электронами, спектров рентгеновской фотоэлектронной и Оже-электронной (при рентгеновском зондировании) эмиссии в широком интервале потерь энергии электронами, полученных при различных энергиях зондирования образцов и геометриях экспериментов для чистых элементов (бериллия, алюминия, магния, кремния, ниобия, вольфрама), для углеводородных соединений, а также для слоисто неоднородных структур SiO_x/Si, Au/Si, Nb/Si. Показано, что используемый подход позволяет с высокой точностью определять компонентный и послойный состав исследуемых образцов.
- Реализована методика решения обратной задачи по восстановлению дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твёрдых телах из экспериментальных данных. Она базируется на многократном решении прямой задачи и сравнении расчётного и экспериментального спектров. Предложенная методика позволяет учитывать различные законы потерь энергии электронами как в однородном удалённом от поверхности массиве мишени, так и в приповерхностных слоях.
- Исследована динамика дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в алюминии в диапазоне начальных энергий электронов от 0,5 до 120 кэВ и в ниобии – от 1 до 40 кэВ.
- На примере бериллия, алюминия, магния, кремния, ниобия и вольфрама показано, что при описании рентгеновских фотоэлектронных спектров не требуется введение дополнительных механизмов потерь энергии, помимо процессов ионизации и возбуждения плазменных колебаний.
- Установлено, что применение единого подхода описания энергетических и угловых распределений электронов допускает использование экспериментальных спектров не только характеристических потерь энергии электронами, но и рентгеновской фотоэлектронной эмиссии для получения информации о характеристиках неупругого рассеяния электронов

в твёрдом теле. Впервые продемонстрирована возможность восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из рентгеновских фотоэлектронных спектров на примере бериллия и вольфрама. Надёжность получаемых данных повышается, если использовать одновременно набор электронных спектров, получаемых при взаимодействии как электронов, так и рентгеновского излучения с анализируемым образцом и при различных углах зондирования и визирования.

- Предложена методика обработки данных спектроскопии пиков упруго отражённых электронов с учётом сигнала, образованного неупруго рассеянными электронами, рассчитанного путём последовательного решения прямой задачи, для получения количественной характеристики. Методика заключается в последовательном восстановлении дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии и дальнейшем их использовании для учёта сигнала многократно неупругого рассеяния. Применение методики сделало возможным определить относительную концентрацию водорода в углеводородном образце.
- Разработан метод определения толщин нанопокровов, использующий единый подход к описанию электронных спектров, по экспериментально измеренным сигналам отражённых электронов в широком интервале потерь энергии. Использование данного метода позволило определить толщины слоёв ниобия, напылённых на подложку из кремния.

Список литературы

1. *Tougaard S., Chorkendorff I.* Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy // *Physical Review B*. — 1987. — Vol. 35, no. 13. — P. 6570–6577. DOI: 10.1103/PhysRevB.35.6570.
2. *Werner W. S. M.* Differential surface and volume excitation probability of medium-energy electrons in solids // *Physical Review B*. — 2006. — Vol. 74, no. 7. — P. 075421. DOI: 10.1103/PhysRevB.74.075421.
3. Kilovolt electron backscattering / V. P. Afanas'ev, S. D. Fedorovich, A. V. Lubenchenko et al. // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. — 1994. — Vol. 96, no. 2. — P. 253–259. DOI: 10.1007/BF01313291.
4. *Афанасьев В. П., Капля П. С.* Теория формирования энергетических спектров отраженных заряженных частиц // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2015. — № 7. — С. 66–71. DOI: 10.7868/S0207352815040034.
5. *Afanas'ev V. P., Efremenko D. S., Kaplya P. S.* Analytical and numerical methods for computing electron partial intensities in the case of multilayer systems // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. — 2016. — Vol. 210. — P. 16–29. DOI: 10.1016/j.elspec.2016.04.006.
6. Differential inverse inelastic mean free path and differential surface excitation probability retrieval from electron energy loss spectra / V. P. Afanas'ev, A. S. Gryazev, D. S. Efremenko, P. S. Kaplya // *Vacuum*. — 2017. — Vol. 136. — P. 146–155. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.10.021.
7. *Salvat F., Jablonski A., Powell C. J.* ELSEPA—Dirac partial-wave calculation of elastic scattering of electrons and positrons by atoms, positive ions and molecules // *Computer Physics Communications*. — 2005. — Vol. 165, no. 2. — P. 157–190. DOI: 10.1016/j.cpc.2004.09.006.
8. *Tanuma S., Powell C. J., Penn D. R.* Calculation of electron inelastic mean free paths (IMFPs) VII. Reliability of the TPP-2M IMFP predictive equation // *Surface and Interface Analysis*. — 2003. — Vol. 35, no. 3. — P. 268–275. DOI: 10.1002/sia.1526.
9. *Tanuma S., Powell C. J., Penn D. R.* Calculations of electron inelastic mean free paths. IX. Data for 41 elemental solids over the 50 eV to 30 keV range // *Surface and Interface Analysis*. — 2011. — Vol. 43, no. 3. — P. 689–713. DOI: 10.1002/sia.3522.
10. *Аккерман А.Ф.* Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. — Москва: Энергоатомиздат, 1991. — С. 200.
11. *Afanas'ev V., Lubenchenko A., Gubkin M.* Quantitative interpretation of EELS and REELS spectra // *The European Physical Journal B - Condensed Matter*. — 2004. — Vol. 37, no. 1. —

P. 117–125. DOI: 10.1140/epjb/e2004-00036-x.

12. *Смирнов Б.М.* Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. — Москва: Атомиздат, 1968. — С. 364.
13. *Doniach S., Sunjic M.* Many-electron singularity in X-ray photoemission and X-ray line spectra from metals // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. — 1970. — Vol. 3, no. 2. — P. 285–291.
14. Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy: A Reference Book of Standard Spectra for Identification and Interpretation of XPS Data / J. Moulder, W. Stickle, P. Sobol, K. Bomben. — Eden Prairie, Minnesota, USA: Physical Electronics Inc., 1992. — P. 261.
15. *van Attekum P. M. T. M., Trooster J. M.* Bulk- and surface-plasmon-loss intensities in photoelectron, Auger, and electron-energy-loss spectra of Mg metal // *Physical Review B*. — 1979. — Vol. 20, no. 6. — P. 2335–2340. DOI: 10.1103/PhysRevB.20.2335.
16. *Werner W. S. M., Glantschnig K., Ambrosch-Draxl C.* Optical Constants and Inelastic Electron-Scattering Data for 17 Elemental Metals // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. — 2009. — Vol. 38, no. 4. — P. 1013. DOI: 10.1063/1.3243762.
17. *Ritchie R. H.* Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films // *Physical Review*. — 1957. — Vol. 106, no. 5. — P. 874–881. DOI: 10.1103/PhysRev.106.874.
18. *Жарников М.В., Горобченко В.Д., Серпученко И.Л.* Поляризация электронов ионных остовов и плазменные возбуждения в переходных металлах // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1987. — Т. 92, № 1. — С. 228–237.
19. Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния на основе спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии / В. П. Афанасьев, А. С. Грязев, Д. С. Ефременко и др. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2016. — № 9. — С. 27–32. DOI: 10.7868/S0207352816090031.
20. Отражение электронов килоэлектронвольтовых энергий от многослойных поверхностей / В. П. Афанасьев, А. В. Лубенченко, С. Д. Федорович, А. Б. Паволоцкий // *Журнал технической физики*. — 2002. — Т. 72, № 11. — С. 100–108.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Афанасьев В.П., Капля П.С., Головина О.Ю., Грязев А.С. Расшифровка спектров РФЭС с последовательным учетом влияния процессов многократного упругого и неупругого рассеяния // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2015. — № 1. — С. 68-73. DOI: 10.7868/S0207352815010035
2. Afanas'ev V., Gryazev A. Angular Distribution of XPS Peaks by Layers of a Finite Thickness // *Advanced Materials Research*. — 2015. — V. 1085. — P. 496-501. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1085.496
3. Afanas'ev V.P., Golovina O.Yu., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Photoelectron spectra of finite-thickness layers // *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* — 2015. — Vol. 33, No. 3 — P. 03D101. DOI: 10.1116/1.4907228

4. Afanas'ev V.P., Kaplya P.S., Gryazev A.S. Angle-resolved photoelectron spectra of layers of finite thickness // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2015. — Vol. 9, №. 3. — P. 590-598. DOI: 10.1134/S1027451015030179
5. Афанасьев В.П., Капля П.С., Головина О.Ю., Грязев А.С., Андреева Ю.О. Расчёт рентгеновских спектров фотоэлектронов в широком интервале потерь энергии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2015. — № 9. — С. 9-14. DOI: 10.7868/S0207352815090048
6. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Кузнецова А.В., Ляпунов Н.В. Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из РФЭС и ХПЭ спектров в бериллии и углероде // *Ядерная физика и инжиниринг*. — 2015 — Т. 6, № 9-10. — С. 498-503. DOI: 10.1134/S2079562915050012
7. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Капля П.С., Андреева Ю.О., Головина О.Ю. Спектры характеристических потерь энергии ниобия, дифференциальные сечения неупругих потерь энергии и рентгеновские фотоэлектронные спектры с угловым разрешением // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2016. — № 1. — С. 73-79. DOI: 10.7868/S0207352815120021
8. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Andreyeva Y.O. Intrinsic Excitation Effect for the Al and Mg Samples XPS Analysis // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2016. — Vol. 10, No. 1. — P. 108-112. DOI: 10.1134/S102745101506004X
9. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Ефременко Д.С., Капля П.С., Ляпунов Н.В. Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния на основе спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2016. — № 9. — С. 27-32. DOI: 10.7868/S0207352816090031
10. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S., Ridzel O.Y. Determination of atomic hydrogen in hydrocarbons by means of the reflected electron energy loss spectroscopy and the X-ray photoelectron spectroscopy // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — V. 748. — P. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/748/1/012005
11. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Differential inverse inelastic mean free path and differential surface excitation probability retrieval from electron energy loss spectra // *Vacuum*. — 2017. — V. 136. — P. 146-155. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.10.021
12. Афанасьев В.П., Головина О.Ю., Грязев А.С., Капля П.С. Расчёт энергетических спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в широком интервале потерь энергии // *XLIV Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами* — Москва, 2014, С. 87.

13. Afanas'ev V.P., Golovina O.Yu., Gryazev A.S., Kaplya P.S. Differential Inverse Inelastic Mean Free Path (DIIMFP) and Differential Surface Excitation Probability (DSEP) Extraction from Electron Energy Loss Spectra (EELS) // *The Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) and the Second International Conference on Emission Electronics (ICEE)*. — 2014. — P. 1-2. DOI: 10.1109/IVESC.2014.6891928
14. Афанасьев В.П., Капля П.С., Грязев А.С., Ефременко Д.С., Андреева Ю.О. Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния на основе спектров характеристических потерь энергии электронов, спектров рентгеновской фотоэлектронной эмиссии и Оже-спектров // *XXII Международная конференция Взаимодействие ионов с поверхностью* — Москва, 2015, Т. 1, С. 299-302.
15. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Капля П.С., Костановский И.А., Ридзель О.Ю. Количественное определение изотопов водорода в конструкционных материалах на основе спектроскопии пиков упруго отраженных электронов и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // *XIX Конференция "Взаимодействие плазмы с поверхностью"* — Москва, 2016, С. 30-33.
16. Afanas'ev V., Andriyanova Yu., Gryazev A., Kaplya P. Reflected electron spectroscopy for depth profiling // *International Conference "Micro- and Nanoelectronics – 2016": Book of abstracts*, Russia, Zvenigorod, 2016, P. 132.
17. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Efremenko D.S., Ridzel O.Yu. Software Tools for Profile Analysis of Multi-Layered Systems by Using the Elastic Peak Electron Spectroscopy // *14th International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD)* — Russia, St. Petersburg, 2016, P. 34-37. DOI: 10.1109/BALD.2016.7886531
18. Афанасьев В.П., Грязев А.С., Капля П.С., Ридзель О.Ю. Исследование зависимости дифференциального сечения неупругого рассеяния электронов в алюминии в диапазоне энергий 0,5-120 кэВ // *XI Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия»* — Москва, 2016, С. 158-162.
19. Афанасьев В.П., Андриянова Ю.Н., Грязев А.С., Капля П.С., Федорович С.Д. Определение послойных профилей материалов методами спектроскопии отраженных электронов // *XIV Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия»* — Москва, 2016, С. 167-171.