



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе НИУ «МЭИ»

д.т.н., профессор

В.К. Драгунов

2017 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По диссертационной работе Грязева Александра Сергеевича «Исследование характеристик рассеяния электронов в твердых телах для определения толщин нанопокрывтий методами электронной спектроскопии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Выписка из протокола № 3 – 16/17 заседания кафедры Общей физики и ядерного синтеза (ОФиЯС) от 29.12.2016 г.

СЛУШАЛИ: Вопрос о рекомендации к представлению в диссертационный совет при Физико-технологическом институте РАН Д 002.204.01 диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» «Исследование характеристик рассеяния электронов в твердых телах для определения толщин нанопокрывтий методами электронной спектроскопии» аспиранта кафедры ОФиЯС Грязева Александра Сергеевича. Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. В.П. Афанасьев.

Доклад А.С. Грязева по материалам диссертации состоялся на научно-техническом совете (НТС) кафедры ОФиЯС 28.12.2016 г. С текстом диссертации ознакомился д.ф.-м.н., проф. каф. ОФиЯС А.В. Елецкий.

На НТС кафедры ОФиЯС присутствовали: д.т.н., чл.-корр. РАН, проф. А.В. Дедов, д.т.н., проф. А.Т. Комов, д.ф.-м.н., проф. В.П. Афанасьев, д.ф.-м.н., проф. А.В. Елецкий, д.т.н., проф. А.В. Лубенченко, д.ф.-м.н., проф. В.П. Будаев, к.т.н., проф. Д.А. Иванов, к.т.н., проф. А.Н. Варава, к.ф.-м.н., доцент И.В. Иванова, к.т.н., доцент С.Д. Федорович, к.ф.-м.н., доцент М.К. Губкин, к.т.н., доцент Г.С. Бочаров, к.ф.-м.н., доцент В.В. Манухин, к.т.н., доцент М.В. Лукашевский, к.т.н., доцент П.П. Щербаков, к.ф.-м.н., доцент В.С. Спивак,



к.т.н., доцент О.Н. Кабаньков, к.ф.-м.н., доцент И.В. Воинкова, к.ф.-м.н., доцент В.М. Кулыгин, к.ф.-м.н., доцент Д.О. Дуников, ассистент Ю.В. Сморгачева, студенты и аспиранты каф. ОФиЯС.

В ходе обсуждения докладчику задавали вопросы: д.ф.-м.н., проф. А.В. Елецкий, д.т.н., проф. А.В. Лубенченко, к.ф.-м.н., доцент М.К. Губкин, к.т.н., доцент С.Д. Федорович.

На заданные вопросы докладчик дал исчерпывающие ответы.

В ходе обсуждения были сделаны замечания, не имеющие принципиального характера и высказанные диссертанту в качестве пожелания.

С положительной оценкой обсуждаемой работы выступили: д.ф.-м.н., проф. А.В. Елецкий, д.ф.-м.н., проф. В.П. Афанасьев, к.ф.-м.н., доцент М.К. Губкин, к.т.н., доцент С.Д. Федорович.

**ПОСТАНОВИЛИ:** Одобрить представленную диссертационную работу как отвечающую требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендовать к защите в диссертационном совете Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте РАН по специальности 05.27.01 “Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах”. Принять следующий текст Заключения.

#### Актуальность темы исследования

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 нем 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 электронами (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 определенных 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 $\alpha$  составляет 900 мэВ, для монохроматического излучения Al K $\alpha$  – 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 объема 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, учет которых ведется за счет введения поправочных коэффициентов. Традиционные методы базируются только на анализе пиков, сформированных электронами, не испытывшими 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 послыхных профилей, соответствующих данной интенсивности фотоэлектронных линий в РФЭС. Из вышеотмеченного следует актуальность создания методов анализа объектов на основе данных электронной спектроскопии с применением современных методов теории переноса частиц и излучений, основанных на последовательном решении обратных задач.

Неразрушающие методы послыхного анализа с использованием электронной спектроскопии основаны на измерениях посредством применения энергетического сканирования образца; 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.

#### Научная новизна исследования

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. Продемонстрирована 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. Отмечена 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.

#### Научная и практическая значимость исследований

- 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. Продemonстрировано, 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 ( $\text{CH}_x$ ,  $\text{SiO}_x$ ).

- 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.

#### Апробация результатов исследования

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”, “Journal of Physics: Conference Series”, “Ядерная физика и инжиниринг”, IEEE. Научные результаты и материалы исследований докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- IX, X, XI, XIII Курчатовская молодежная 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, надежности и безопасности работы энергетического оборудования ТЭС и АЭС» (2012 г.);
- XXXVIII, XXXIX, XLII Международная молодежная 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” (2016 г.).



### Личный вклад автора

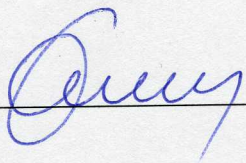
Материалы и результаты диссертационного исследования получены соискателем лично или с соавторами. Личный вклад автора для достижения полученных результатов носит определяющий характер и заключается в получении и обобщении данных по дифференциальным сечениям неупругого рассеяния электронов в твердых телах, 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.

### Рекомендация диссертации к защите

Диссертационная работа А.С. Грязева «Исследование характеристик рассеяния электронов в твердых телах для определения толщин нанопокровов методами электронной спектроскопии» выполнена в Национальном исследовательском университете «МЭИ» и является законченной научно-исследовательской работой. По объему проведенных исследований и значимости полученных результатов, она полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертационной работы является высококвалифицированным научным работником в области решения обратных задач теории переноса частиц.

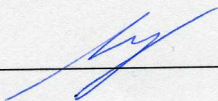
Кафедра Общей физики и ядерного синтеза рекомендует диссертацию А.С. Грязева к защите в диссертационном совете Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте РАН по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Зав. кафедрой ОФИЯС  
д.т.н., чл.-корр. РАН, профессор



А.В. Дедов

Ученый секретарь кафедры  
к.ф.-м.н., доцент



И.В. Иванова