

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Грязева Александра Сергеевича «Исследование характеристик рассеяния электронов в твёрдых телах для определения толщин нанопокровов методами электронной спектроскопии», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, по специальности **05.27.01** – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертация А.С. Грязева посвящена совершенствованию существующих и созданию новых методов исследования поверхности различных мишеней, на основе электронной спектроскопии.

Подробная информация о процессах взаимодействия электронов с энергиями в интервале от сотен эВ до десятков кэВ с твердыми телами представляет интерес для построения методик интерпретации энергетических спектров различных видов электронной спектроскопии. Для реализации возможностей электронной спектроскопии, располагающей средствами измерения энергетических спектров отраженных электронов или фотоэлектронов с абсолютной точностью в сотые доли эВ в широком интервале углов визирования необходимо создание соответствующих методов расшифровки экспериментальных данных. Созданные в восьмидесятые годы прошлого века и используемые сегодня методы интерпретации экспериментальных данных значительно ограничивают потенциальные возможности электронной спектроскопии. Это определяет актуальность диссертационной работы.

Научная новизна

Развиты методы определения дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твёрдых телах из экспериментальных данных; в работе показано, что наиболее эффективным и корректным с физической точки зрения методом определения сечений является метод подбора.

Установлена возможность применения метода парциальных интенсивностей для представления энергетических спектров рентгеновской фото- и Оже-электронной эмиссии (РФЭС, ЭОС), характеристических потерь энергии прошедших сквозь слой и отраженных электронов (ХПЭ) на основе единого подхода к описанию переноса электронов в веществе, используя одинаковые дифференциальные сечения неупругого рассеяния в соответствующих геометрических областях образцов.

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.

Реализованы вычислительные методы, позволяющие повысить пространственное разрешение послойного анализа, использующие спектроскопию отражённых электронов (СОЭ) в интервале потерь энергии от 0 до ~ 0.5 от начальной энергии. Развита теория описания энергетических спектров электронов, отраженных от слоисто неоднородных мишеней.

Научная и практическая значимость

Продemonстрирована возможность использования реализованной методики для восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из экспериментальных спектров РФЭС однокомпонентных веществ, а также оксидов, нитридов и других химических соединений, систематизированных в различных базах данных.

На основе метода парциальных интенсивностей, дано описание спектров электронной спектроскопии в едином подходе. Показано, что последовательный учет процессов многократного рассеяния при описании сигналов ХПЭ и РФЭС позволяет применять данный подход без привлечения дополнительных корректирующих величин.

Предложенные методы описания электронных спектров можно использовать не только для анализа объектов микро- и нанoeлектроники, но и для исследования поверхностей материалов обращенных к плазме в термоядерных реакторах.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения, имеет объём – 91 страницу с 50 рисунками, 5 таблицами и 115 литературными источниками.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, его цель и задачи, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость.

В **первой главе** приведён обзор современных методов анализа поверхности, изложены основные существующие подходы к послойному анализу поверхности разрушающими и неразрушающими методами. Кратко приведено текущее состояние исследований поверхности наиболее популярным методом электронной спектроскопии – рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). В данной главе также проанализированы методы восстановления из экспериментальных данных одной из важнейших рассеивающих характеристик среды – дифференциальных по энергиям сечений однократного неупругого рассеяния электронов. Показана перспективность решения задачи получения сечений неупругого рассеяния из экспериментальных данных на основе метода «подбора».

Во **второй главе** приводится методика вычисления энергетических спектров электронов, отражённых, прошедших сквозь слой, эмитированных как полубесконечными слоями, так и слоями конечной толщины. Граничная задача для уравнения переноса

решается с использованием метода инвариантного погружения. В главе представлены алгоритмы расчёта энергетических спектров многослойных систем. Показано, 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.

В **третьей главе** внимание сфокусировано на одной из основных характеристик рассеивающей среды – дифференциальном сечении неупругого рассеяния электронов. Приведен метод определения сечений из экспериментальных данных методом «подбора». Он базируется на многократном решении прямой задачи с варьируемыми параметрами сечений и сравнении расчётного и экспериментального спектров (минимизация функционала). Предложенная методика позволяет учитывать различные законы потерь энергии электронами как в однородном удалённом от поверхности массиве мишени, так и в приповерхностных слоях.

Приведены результаты выполнения процедуры восстановления сечений неупругого рассеяния электронов как в двухслойной, так и в трёхслойной моделях. Полученные из экспериментальных спектров сечения для алюминия в диапазоне начальных энергий электронов от 0.5 до 120 кэВ и для ниобия – от 1 до 40 кэВ позволяют рассчитывать спектры при любых углах зондирования и визирования и при любых промежуточных энергиях.

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.

В **четвёртой главе** приводятся результаты анализа сигналов электронной спектроскопии от различных образцов. Исследование углеводородного образца основывалось на совместной интерпретации спектров ХПЭ и РФЭС с использованием одинаковых сечений неупругого рассеяния электронов. Для вычисления относительной концентрации водорода были определены интенсивности пиков, образованных упруго отражёнными электронами от водорода и углерода, с учётом фона, образованного многократными неупругими рассеяниями электронов. Величина n_H/n_C составила 1.3 в приповерхностной области размером около 10 нм.

Разработанные методы, использующих дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов и учитывающих многократные упругие и неупругие рассеяния электронов, применены для определения толщины слоёв в слоистых образцах по спектрам РФЭС (SiO_x/Si , Au/Si) и по спектрам СОЭ (Nb/Si). Размеры толщин слоёв, которые можно определить по спектрам РФЭС, составили порядка 0.1-10 нм.

Использование спектров СОЭ позволяет менять энергию электронов и, тем самым, глубину зондирования. Так электроны с энергиями 16 кэВ позволяют определять толщины до сотен нанометров. Увеличение энергии зондирующего пучка электронов увеличивает глубину анализа, но в то же самое время уменьшает точность определения толщин.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

К диссертационной работе А.С. Грязева имеется несколько замечаний:

1. Дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов автор разделяет на приповерхностные и объёмные. Необходимо дать четкое определение такого разделения и пояснить его физический смысл.
2. Согласно формулам (3.2)-(3.5), основными механизмами потерь энергии электронов принимаются нелокальные потери на возбуждение плазменных колебаний и локальные потери на ионизацию. Следует оценить также потери энергии электронами на создание электронно-дырочных пар.
3. Так как для реальных мишеней далеко не всегда поверхность является идеально плоской, то каким образом в расчётах происходит учёт шероховатости поверхности.
4. Некоторое количество графического и теоретического материала диссертации А.С. Грязева очень похоже, а где-то и совпадает с материалами, представленными в диссертации П.С. Капля, выполненной в том же научном коллективе и успешно защищенной ранее. В сложившейся ситуации диссертант должен был более контрастно выделить новые результаты и более четко определить личный вклад в выполненную работу.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации и не затрагивают сути полученных результатов.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Её материалы своевременно опубликованы в ведущих журналах (11 статей, опубликованных в российских и иностранных изданиях, входящих в список ВАК), докладывались на российских и международных конференциях.

Диссертационная работа Грязева А.С. соответствует паспорту специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах (физико-математические науки).

Диссертационная работа Грязева А.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пункт 9), а её автор, А.С. Грязев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах, за определение дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в твёрдых телах из экспериментальных данных, и разработку метода расчёта толщин нано слоёв в слоистых мишенях из данных электронной спектроскопии.

08.06.2017 г.

Мартыненко Юрий Владимирович

д.ф.-м.н. по специальности 01.04.04 – физическая электроника, главный научный сотрудник,
лаборатория перспективных экспериментов, отдел теории плазмы,
Курчатовского ядерно-технологического комплекса

НИЦ «Курчатовский институт»,

E-mail: martynenko_YV@nrcki.ru

Тел.: +8 (499) 196 70 41

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Мартыненко Ю.В. заверяю,
Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



С.Ю. Стремоухов

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1;

Тел.: +7 (499) 196-95-39; e-mail: nrcki@nrcki.ru