

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

В диссертационной работе А.С.Грязева обсуждаются актуальные проблемы неразрушающего анализа поверхности материалов на основе исследования энергетических спектров электронов. При текущем развитии технологического оборудования в области нано- и микроэлектроники в области диагностики создаваемых нано- и микросистем возрастает роль корректного и точного анализа таких систем. Начинают использоваться более тонкие эффекты в сигналах электронной спектроскопии. Используемые в настоящее время подходы к теоретическому описанию рентгеновских фотоэлектронных спектров (РФЭС) базируются на теории, разработанной в 1980-е гг. Вместе с тем существуют приборы, позволяющие снимать спектры в широких диапазонах углов визирования, как с вращением образца, так и одновременно регистрируемых наборах спектров ($\pm 35^\circ$). Всё большее развитие получают установки, в которых реализуется спектроскопия отраженных электронов. Её преимуществом является то, что значительно проще менять начальную энергию зондирующих частиц с помощью электронных пушек, чем для рентгеновских источников. В свою очередь с увеличением энергии электронов появляется возможность получать информацию с больших глубин образцов, проводить неразрушающий послойный анализ. Совершенствованию методик расшифровки электронных спектров существующих и вновь создаваемых способов анализа поверхности посвящено множество работ, в том числе и данная диссертационная работа.

Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы А.С. Грязева состоит в следующем.

Усовершенствована методика восстановления одной из важнейших характеристик рассеяния электронов в твёрдых телах – дифференциального сечения неупругого рассеяния – в рамках единого подхода к описанию формирования спектров многократных упругих и неупругих рассеяний электронов в твёрдом теле. Методика реализована для ряда однокомпонентных мишеней (Be, Al, Mg, Si, Nb, W) и соединений (CH_x , SiO_x).

Впервые реализована методика восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов по экспериментальным спектрам рентгеновской фотоэлектронной эмиссии. Показано, что для повышения качества и большей достоверности и правомерности применения восстанавливаемых сечений необходимо использовать набор спектров, полученных как при разных углах зондирования и визирования, так и с помощью разных типов электронной спектроскопии (ХПЭ "на прострел" и "на отражение", РФЭС).

Реализованы вычислительные методы, позволяющие повысить пространственное разрешение послойного анализа в спектроскопии отраженных электронов (СОЭ). Развита теория описания энергетических спектров электронов, отраженных от слоисто неоднородных мишеней.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. В первой главе приведён обзор современных методов анализа поверхности твёрдых тел, краткие сведения по различным типам электронной спектроскопии, а также представлен существующий формализм в анализе спектров РФЭС. Помимо этого в этой главе даётся обзор методов извлечения дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из экспериментальных спектров ХПЭ. Показано, что в настоящий момент существует необходимость в едином подходе к анализу электронных спектров без введения дополнительных корректирующих коэффициентов.

Вторая глава содержит описание и развитие методов расчёта электронных спектров электронов, отражённых, прошедших сквозь слой, эмитированных слоями конечной толщины. Граничная задача для уравнения переноса решается с использованием метода инвариантного погружения. Приведен порядок решения прямой задачи – расчёта энергетических спектров ХПЭ, РФЭС и ЭОС многослойных систем.

Третья глава посвящена центральной в данной работе характеристике рассеяния электронов в твёрдом теле – дифференциальному сечению однократного неупругого рассеяния электрона. Извлечение сечений из экспериментальных данных ведётся в двух- или трёхслойных моделях. Это объясняется разными законами потерь энергии в массиве мишени, удалённой от поверхности, и в приповерхностных слоях. Впервые сечения неупругого рассеяния электронов восстановлены из спектров РФЭС. Основательно автором проверялась актуальность получаемых сечений: сечения, полученные из спектров ХПЭ, подставлялись без изменения для расчёта спектров РФЭС и наоборот. Описание спектров во всех случаях удовлетворительное, что позволяет говорить об их адекватности соответствующим элементам.

В четвёртой главе приводятся три примера использования методики восстановления сечений для получения не только качественных, но и количественных характеристик исследуемых образцов. Так для углеводородного образца была определена величина относительной концентрации водорода. Это открывает возможность точнее определять, например, относительные концентрации для изотопов водорода, других легких элементов. Так как данный способ анализа относится к одновременному использованию спектроскопии пиков упруго отраженных электронов, РФЭС и ХПЭ. Проанализированы образцы кремния, золота и золота на подложке из кремния, определены толщины слоёв по спектрам РФЭС, выявлена важность учета многократных упругих и неупругих рассеяний электронов. Ещё в работе реализован метод анализа спектров СОЭ с использованием эффективных сечений неупругого рассеяния. Данный подход актуален, если спектр снят с низким энергетическим разрешением. Полученные толщины напыленных слоев ниобия на кремнии удовлетворительно коррелируют с данными, полученными иным, не на анализе электронных спектров, способом.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей корреляцией расчётных спектров с экспериментальными данными. Обоснованность использования дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов, восстановленных в диссертационной работе, подтверждается тем, что, во-первых, они применяются и могут быть

применимы для различных типов электронной спектроскопии. Во-вторых, их можно использовать при различных углах зондирования мишени и визирования электронов. В-третьих, приведено их сравнение с существующими аналогами из литературных данных, полученными другими зарубежными научными группами. Полученные количественные характеристики анализируемых мишеней согласуются с результатами исследований иными методами.

Замечания по диссертации

1. Вторая глава написана весьма конспективно. Не приведены окончательные формулы и не пояснено в тексте работы, как рассчитываются коэффициенты R_k , T_k , Q_k , A_k в уравнениях типа (2.4). Материал второй главы диссертации следовало бы изложить более подробно.
2. В п. 3.4 "Восстановление дифференциальных сечений неупругого рассеяния Nb" на рис. 3.17 сравниваются экспериментальные спектры ХПЭ с расчётными при различных энергиях зондирующего пучка электронов (5, 10, 20, 25, 40 кэВ). Итоги реализации процедуры восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов представлены на рис. 3.18. Однако, на нём приведены сечения только для энергии 5 кэВ.
3. В работе не указано, как именно автор использовал метод подбора при восстановлении дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов. Следовало бы усовершенствовать процедуру подбора и автоматизировать данный процесс программными средствами.
4. Несколько опечаток в диссертации и в автореферате: стр. 8, – лишние слова «в хендбуках.»; стр. 11, в словах «обуччловлена» «пверхности»; в названии пп. 3.2.1 и 3.2.2 – «восстоновления».

Сделанные замечания не сказываются на положительной оценке работы в целом. Результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных конференциях, опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Диссертация А.С. Грязева «Исследование характеристик рассеяния электронов в твёрдых телах для определения толщин нанопокровов методами электронной спектроскопии» представляет собой законченное исследование, полученные в ней результаты обладают научной новизной и практической ценностью, их достоверность не вызывает сомнения. Диссертация А.С. Грязева полностью отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждённого постановлением Правительства РФ №842, 24.09.2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.


Борисов Анатолий Михайлович
д.ф.-м.н. (специальность 01.04.08 - физика плазмы,
01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики),
профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
профессор кафедры «ТППИСУЛА»,
109383, Москва, ул. Полбина д. 45
E-mail: anatoly_borisov@mail.ru
тел. +7 (495) 353-8334

Подпись А.М. Борисова заверяю

И.о. начальника отдела УДС

9 июня 2017 г

Т. А. Аникина
(подпись)

