

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Грязева Александра Сергеевича

"Исследование характеристик рассеяния электронов в твердых телах для определения толщин нанопокровов 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"

Методы диагностики многослойных тонкопленочных структур широко используются в микро- и нанoeлектронике как для анализа сформированных структур, так и для мониторинга технологических процессов их получения. При этом безусловный интерес представляют методы неразрушающей диагностики. Одним из таких методов, позволяющих определить профиль состава многослойной тонкопленочной структуры по глубине, является метод спектроскопии электронов, как отраженных от структуры, так и порожденных в ней зондирующим пучком рентгеновского излучения.

В представленной диссертации автор развивает универсальную модель формирования угловых и энергетических распределений электронов, пригодную для работы практически со всеми современными методами электронной спектроскопии твердого тела. На основе указанной модели автор разрабатывает метод решения обратной задачи, которая в данном случае относится к классу некорректных задач математической физики. Большое внимание в работе уделено методам извлечения из экспериментальных спектров информации о дифференциальных сечениях неупругого рассеяния электронов в исследуемых материалах. Наконец, возможности развитого подхода продемонстрированы на нескольких тестовых структурах. Рассмотрим содержание автореферата более подробно.

В автореферате приведено краткое описание универсальной модели для расчета энергетических спектров электронов, которые формируются при отражении или прохождении зондирующего электронного пучка, а также при генерации электронов в исследуемой структуре под действием зондирующего пучка рентгеновского излучения. Кроме того, приведены формулы, полученные для двухслойной и трехслойных моделей, которые в дальнейшем используются для анализа структур типа "тонкая пленка на подложке".

Значительную часть автореферата занимает изложение результатов, полученных при решении актуальной задачи восстановления дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов из экспериментальных электронных спектров. Приведены основные

расчетные формулы для дифференциальных сечений и выражение для функционала, в минимизации которого и состоит используемый автором метод фитинга. Важно отметить, что для верификации полученных дифференциальных сечений автор использует довольно жесткую процедуру: сечения, полученные из экспериментальных спектров характеристических потерь электронов (СХПЭ), используются для моделирования экспериментальных спектров РФЭС (и наоборот). Такая процедура практически исключает любые случайные ошибки или неоптимальные (в математическом смысле) решения. Эта часть автореферата иллюстрирована многочисленными графиками, которые позволяют убедиться в высокой эффективности и надежности предложенной автором процедуры восстановления дифференциальных сечений. Отметим также, что каждый пример экспериментального спектра сопровождается подробным анализом физических механизмов потерь и их вкладов в электронный спектр. В свою очередь, результаты выполненного анализа используются автором для выбора расчетной модели.

Разработанный подход далее используется для анализа нескольких конкретных структур. В качестве первого примера рассмотрена задача определения относительной концентрации водорода в приповерхностном углеводородном слое толщиной 6.5 нм путем совместной обработки экспериментальных спектров ХПЭ и РФЭС. В качестве второго примера рассмотрена задача определения толщины пленки золота, нанесенной на кремниевую подложку, путем обработки экспериментальных спектров РФЭС. Показано, что предложенный автором метод позволяет определять толщину пленки золота в диапазоне от долей нанометра до 10 нм. Наконец, в третьем примере представлены результаты определения толщины пленок ниобия, полученных на кремниевой подложке при различных временах напыления. При этом использовались экспериментальные спектры отраженных электронов. Показано, что при увеличении энергии первичного пучка увеличивается предельная толщина пленки ниобия, которую можно измерить, но, с другой стороны, уменьшается точность ее определения. Приведенные автором примеры применения развитого им подхода показывают возможности метода и дают представление об его точности.

В целом можно утверждать, что результаты работы свидетельствуют об эффективности развитого автором метода диагностики многослойных тонкопленочных структур и разработанных на основе этого метода алгоритмов решения обратной задачи. Дальнейшее развитие этого подхода позволит рассматривать более сложные по составу тонкопленочные структуры.

Следует отметить, что работа не лишена некоторых недостатков. В частности, не описана математическая процедура минимизации целевого функционала (11), результаты

которой в условиях большого количества подгоночных параметров могут быть неоднозначными. Не слишком удачным кажется использование названия "метод подбора" для процедуры минимизации вместо обычно используемого словосочетания "метод подгонки".

Несмотря на указанные замечания, работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Грязев Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 - "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах".

Отзыв составил ведущий научный сотрудник лаборатории ионно-лучевых технологий Физико-технологического института (ФТИАН РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский проспект 36, корп. 1), кандидат физико-математических наук Кудря Владимир Петрович (тел.: (499) 129-76-33, e-mail: kvp@ftian.ru).



24.05.2017

Подпись руки Кудри В.П. заверяю.

Ученый секретарь

Физико-технологического института (ФТИАН РАН)

кандидат технических наук



Кальнов В.А.