

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Комолова Алексея Сергеевича на диссертационную работу Ложкина Максима Сергеевича по теме **«Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводородов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Ложкина Максима Сергеевича посвящена исследованию физических особенностей процессов обратного рассеяния электронов в конденсированной среде, моделированию геометрии области эмиссии обратного рассеяния электронов и экспериментальному установлению свойств углеродных микро- и наноструктур на поверхности, сформированных в результате воздействия на поверхность падающего пучка электронов с энергией порядка 10 кэВ.

Облучение поверхности твердого тела потоком падающих электронов сопровождается эмиссией электронов и фотонов. Анализ характеристик эмитированных электронов лежит в основе ряда электроно-спектроскопических методик, применяемых в физике поверхности, физике конденсированного состояния, инженеринге поверхностных микро- и наноструктур. В потоке эмитированных электронов присутствуют обратнорассеянные электроны (ОРЭ). Анализ характеристик потока ОРЭ с поверхности неоднородного образца, состоящего из двух или более слоев различных материалов, позволяет экспериментально установить толщину и взаимное расположения слоев. Область поверхности, в которой происходит процесс обратного рассеяния называют зоной эмиссии ОРЭ, и в ней возможно синтезировать углеродные поверхностные структуры. Так, при облучении образца сфокусированным пучком электронов адсорбированные углерод-содержащие адсорбаты диффундируют к точке падения пучка и в зоне эмиссии ОРЭ распадаются с формированием кольцеобразного слоя аморфного углерода.

Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с систематическим исследованием процессов обратного рассеяния электронов на поверхности твердого тела, синтезом и установлением свойств углеродных микро- и наноструктур на поверхности, является актуальной.

Цель работы состояла в изучении физических особенностей процессов обратного рассеяния электронов в конденсированной среде и в изучении процессов осаждения углеводородов при воздействии на поверхность падающего электронного пучка. Подробный анализ известных ранее литературных данных по теме проведенной работы представлен в **первой главе** диссертационной работы. Приведен краткий обзор основных методов исследования внутренней структуры слоистых образцов, особое внимание в котором уделено группе неразрушающих методов исследования, построенных на применении сфокусированного пучка ускоренных электронов в качестве зондирующего воздействия. Отмечено общее сходство упомянутой группы методов, заключающееся в регистрации суммарной интенсивности наблюдаемого отклика образца, которая не отражает особенности распределения электронной плотности внутри области взаимодействия. Рассмотрен подход к исследованию результатов рассеяния пучка первичных электронов, основанный на пространственном распределении потока ОРЭ, учитывающий это свойство.

Во **второй главе** описаны методы исследования, использованные в данной диссертационной работе, и представлено описание объектов исследования. Основной экспериментальной методикой для синтеза углеродных микро- и наноструктур на поверхности являлась электронная литография со скрещенными лучами, реализованная на аппарате Carl Zeiss CrossBeam 1540XB. Для контроля концентрации и состава остаточных газов в вакуумной камере использовали метод вторичной ионной масс-спектрометрии. Для контроля структуры многослойных систем применяли метод поперечного среза путем травления сфокусированным ионным пучком. **Третья глава** посвящена рассмотрению методов теоретических расчетов сечений упругого и неупругого рассеяния электрона в твердом с использованием моделирования методом Монте-Карло, компьютерному моделированию свойств объема взаимодействия при облучении твердых тел пучком ускоренных электронов. В **четвертой главе** приведены результаты экспериментального исследования закономерностей осаждения углеводородов, индуцированного электронным пучком, и представлена теоретическая модель, описывающая формирование углеродных микро- и наноструктур на поверхности в результате облучения электронным пучком.

В ходе работы сформулированы выводы и четыре защищаемых положения, основное обсуждение которых представлено в **четвертой главе**.

В результате диссертационной работы впервые проведено формирование углеродных микро- и наноструктур кольцевой формы путем воздействия на углеродосодержащие поверхностные адсорбаты сфокусированным пучком электронов средних энергий.

В диссертационной работе предложена модель индуцированного осаждения, связывающая диффузионный поток молекул углеводородов с удалённой от центра частью латерального распределения плотности тока обратнорассеянных электронов, которая объясняет изменение размера кольцевых структур в зависимости от параметров пучка первичных электронов. Применение этой модели позволяет объяснить зависимость между смещением границы углеродного микрокольца и изменением протекающего тока и энергии падающего электронного пучка. Показано, что размер микрокольца, формирующегося на поверхности облучаемого электронами твердого тела, определяется удаленной от центра частью латерального распределения плотности тока обратнорассеянных электронов.

В диссертационной работе впервые показано, что плотность твердого тела является основной физической характеристикой, определяющей форму и протяженность облака обратнорассеянных электронов на его поверхности. При этом характер зависимости размера углеродного микрокольца от толщины слоя, расположенного на поверхности подложки, определяется соотношением плотностей материалов слоя и подложки. Размер кольца монотонно растет, когда плотность материала слоя меньше плотности подложки, и линейно падает в обратном случае.

В работе предложен и опробован новый метод, метод электронной нанотомографии, проведения глубинного зондирования многослойных структур, основанный на установленной зависимости латерального распределения плотности тока обратнорассеянных электронов от элементного состава, плотности и толщины пересекаемых ими слоев материалов и от тока, энергии первичного пучка электронов. Установлены результаты по профилированию структур Au/C/Pt, Au/Si, Al/C/Si, Al/Cu. Показано, что типичная погрешность определения толщины и глубины залегания дискретных слоев составляет 10-15 нм в структурах с общей толщиной слоев несколько сотен нанометров.

Все защищаемые положения, основные выводы и результаты, изложенные в диссертации, являются новыми, то есть получены впервые и вносят существенный вклад в физику конденсированного состояния. Защищаемые положения и выводы вполне обоснованы, они базируются на комплексе научных экспериментов, проведенных автором, и теоретическом

анализе полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного научного оборудования, в том числе системы электронной литографии со скрещенными лучами Carl Zeiss CrossBeam 1540XB. Результаты диссертации прошли достойную апробацию на Российских и международных научных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 8 научных статей. Из них 3 статьи изданы в журналах, которые входят в международные базы научного цитирования Web of Science и/или Scopus.

Некоторые частные аспекты обсуждаемой диссертационной работы, как и любой большой научной работы, требуют дополнительного пояснения, вследствие чего возникли следующие замечание и вопросы.

1. В начальной части работы отсутствует подраздел, обычно называемый «Объекты исследования». В подразделе «Методология и методы исследований» про объекты исследования также практически ничего не говорится. Автор ограничился лишь словосочетаниями «поверхности неоднородных образцов», «многослойных структур» и «осаждения углеводородов». Это крайне неудобно читателю, так как для получения информации об объектах исследования ему приходится углубиться в содержание глав 2 и 4.

2. Формулировка задач диссертационной работы мало отражает то, какие именно объекты было запланировано исследовать. Например, в задаче 1 указано следующее. «моделирование методом Монте-Карло и применение к неоднородным по глубине образцам». К каким образцам? Ко всем существующим?

3. В отношении степени решения задачи 3 хотелось бы задать вопрос относительно исследованных поверхностей. Так, в работе для формирования образцов использовались следующие материалы подложек: Si, GaAs, HOPG, платина, медь. А в качестве тонких пленок на подложке исследованы термически осажденные слои Al, Au, Cu и осажденные методом дугового испарения слои аморфного углерода. Поясните, пожалуйста, для построения модели индуцированного осаждения, впервые предложенной в данной диссертационной работе, использовались результаты от всех возможных комбинаций перечисленных подложек и осажденных слоев или были отобраны некоторые оптимальные пленочные структуры?

4. Действительно ли, как указано в разделе 4.2.2, в качестве структуры, содержащей более двух слоев, исследовали лишь одну структуру в виде слоя углерода, в которой в качестве подложки выбрана двухслойная структура Au 50 нм на массивном кристалле кремния?

В целом, диссертационная работа Ложкина Максима Сергеевича «Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводородов» является полной научно-квалификационной работой. Представленные в работе результаты вносят существенный вклад в решение фундаментальной научной проблемы установления свойств углеродных микро- и наноструктур на поверхности, сформированных в результате воздействия на поверхность падающего пучка электронов с энергией порядка 10 кэВ. Результаты работы могут быть применены при разработке методов неразрушающего измерения толщины однослойных и многослойных тонких покрытий Al, Au, Cu, C на поверхности твердого тела.

Все приведенные выше замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Считаю, что работа Ложкина Максима Сергеевича на тему: «Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводородов» полностью соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Ложкин Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

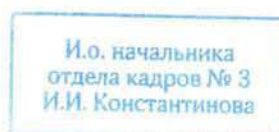
Председатель диссертационного совета
доктор физико-математических наук, ученое звание – доцент,
профессор кафедры электроники твердого тела Санкт-Петербургского
государственного университета

29 сентября 2023 г.



/Комолов А.С./

Личную подпись Комолова Алексея Сергеевича удостоверяю



Комолов
А.10.2023