

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Емелина Алексея Владимировича 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 конденсированных средах, моделированию распределения поверхностной плотности тока обратнорассеянных электронов, а также изучению закономерностей индуцированного электронным пучком осаждения углеродных микро- и наноструктур на поверхности твёрдых тел.

Для изучения свойств поверхности и приповерхностной области твёрдого тела широко применяются вторичные потоки электронов и фотонов, сопровождающие облучение сфокусированным пучком ускоренных электронов. Среди выходящих через поверхность электронов присутствуют обратнорассеянные электроны (ОРЭ), обладающие сравнительно большой глубиной выхода и, таким образом, способные нести информацию о свойствах твёрдого тела на достаточной глубине приповерхностной области. Изучение распределения плотности тока ОРЭ на поверхности неоднородного образца, состоящего из двух или более слоев различных материалов, позволяет экспериментально установить толщину и взаимное расположения слоев. В качестве характеристичной особенности распределения ОРЭ на поверхности предлагается использовать границу кольцеобразной углеродной структуры, формирующейся из слоя адсорбированных молекул углеводородов в процессе облучения электронами. Фактически, данный подход является методом проведения нанотомографии приповерхностной области твердого тела и наногетероструктур.

Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с систематическим исследованием процессов обратного рассеяния электронов на поверхности твердого тела, формированием и

установлением свойств углеродных микро- и наноструктур на поверхности, является актуальной.

Цель работы состояла в выяснении особенностей обратного рассеяния электронов, которые могут быть использованы для изучения внутреннего состава твёрдых тел, в частности, неоднородных по своему составу

Диссертационная работа имеет классическую структуру и состоит из введения, четырех глав и заключения.

В **первой главе** диссертационной работы представлен анализ известных ранее литературных данных по теме проведенной работы. В Главе приведен краткий обзор основных методов исследования состава и структуры многослойных образцов, особое внимание в котором уделено группе неразрушающих методов исследования, построенных на применении сфокусированного пучка ускоренных электронов в качестве зондирующего воздействия.

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 являлось индуцированное электронным лучом осаждение молекул углеводородов из атмосферы остаточных газов, реализованное в рабочей камере станции электронной нанолитографии Carl Zeiss CrossBeam 1540XB. Контроль концентрации и состава остаточных газов в вакуумной камере проводился методом масс-спектрометрии вторичных ионов. Для определения параметров структуры многослойных образцов применялся метод формирования поперечного среза путем травления сфокусированным пучком ионов галлия.

**Третья глава** посвящена рассмотрению основных подходов к определению сечений упругого и неупругого рассеяния электрона в твердом теле для последующего использования при моделировании методом Монте-Карло, а также компьютерному моделированию свойств объема взаимодействия при облучении твердых тел пучком ускоренных электронов.

В **четвертой главе** приведены основные 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 заключении сформулированы выводы и четыре защищаемых положения.

В работе впервые показано, что метод индуцированного осаждения прекурсора сфокусированным пучком электронов средних энергий позволяет реализовать целенаправленное формирование кольцевых наноструктур на поверхности.

Представлена модель индуцированного осаждения, связывающая диффузионный поток молекул углеводородов с удалённой от центра частью латерального распределения плотности тока обратнорассеянных электронов, объясняет изменение размера кольцевых структур в зависимости от параметров пучка первичных электронов.

Впервые показано, что плотность твёрдого тела является основной физической характеристикой, определяющей форму и протяжённость облака обратнорассеянных электронов на его поверхности

Установлено, что характер зависимости размера микрокольца от толщины слоя, нанесённого на массивную подложку, определяется соотношением плотностей материалов слоя и подложки. Размер кольца монотонно растёт, когда плотность материала слоя меньше плотности подложки, и линейно падает в обратном случае.

Все защищаемые положения, основные выводы и результаты, изложенные в диссертации, являются оригинальными и получены впервые и вносят существенный вклад в физику конденсированного состояния. Защищаемые положения и выводы, базируясь на комплексе экспериментальных исследований и теоретическом анализе полученных результатов, проведенных автором, представляются вполне обоснованными. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного научного оборудования. Результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных научных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 8 научных работ. Из них 3 статьи изданы в журналах, которые входят в международные базы научного цитирования Web of Science и/или Scopus.

При прочтении диссертационной работы возникли следующие вопросы и замечания:

1. Как при проведении моделирования (Рисунок 3.1) происходит выбор типа столкновения: упругого или неупругого?
2. Характеризация материала подложки по радиусу кольца проводилась при заданных экспериментальных параметрах (Рисунок 4.20): начальная энергия электронов – 20 эВ, ток – 385 пА, время экспозиции - 10 минут. Являются ли

эти параметры оптимальными для характеристики любого материала подложки?

3. Проверялась ли возможность установления дефектных областей подложки по искажению формы кольца?

В целом, диссертационная работа Ложкина Максима Сергеевича «Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводов» является законченной 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 пучка электронов. Результаты работы могут быть применены при разработке методов неразрушающего измерения толщины однослойных и многослойных тонких покрытий Al, Au, Cu, C на поверхности твердого тела.

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 углеводов» 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. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры фотоники  
Санкт-Петербургского государственного университета  
email: [alexei.emeline@spbu.ru](mailto:alexei.emeline@spbu.ru)

2 ноября 2023 г.

 /А.В. Емелин/



02.11.2023