

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Рябчука Владимира Константиновича на диссертацию Ложкина Максима Сергеевича на тему «Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводородо», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

В диссертационной работе Ложкина Максима Сергеевича обобщены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов обратного рассеяния электронов (ОРЭ) в твердых телах, индуцированных сфокусированным пучком электронов и приводящих к образованию микро- и наноструктур аморфного углерода (микро- и нанокольца, нпностолбики). В результате проведенных исследований установлен ряд новых эмпирических закономерностей, связывающих тип и параметры углеродных структур на поверхности с характеристиками облучаемого твердого тела. Предложена модель образования поверхностных углеродных структур, включающая моделирование траекторий ОРЭ методом Монте Карло. Показано, что форма и размеры углеродных структур определяются как диффузионными процессами на поверхности, так и особенностями обратного рассеяния электронов, что позволят судить о форме и размерах приповерхностной области, из которой эмитируются ОРЭ. На основании результатов исследования полислоиных твердотельных образцов предложен новый неразрушающий метод измерения толщины отдельных слоев. Точность предложенного метода верифицирована при сопоставлении с аналогичными результатами, полученными методом поперечных срезов. Насколько мне известно, подобные систематические исследования полислои образцов ранее не проводились. Таким образом, новизна, актуальность и практическая значимость диссертационной работы Ложкина М.С. не вызывают сомнений.

Диссертация Ложкина М.С. построена по классической схеме. Она содержит Введение, Литературный обзор (Глава 1), две главы методического характера: Экспериментальные методы (Глава 2) и Теоретические методы исследования (Глава 3), Результаты и их обсуждение (Глава 4) и Заключение. Список литературы (114 наименований).

Во Введении кратко охарактеризована область исследований, к которой относится диссертационная работа. Представлены обязательные сведения о диссертации, ее структуре и содержании, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены защищаемые положения.

В Главе 1 (Обзор литературы, 39 стр.) В этом разделе, наряду с кратким введением в физику взаимодействия электронов с твердым телом, достаточно подробно проанализированы результаты исследований физических процессов, непосредственно связанных с темой диссертации. Это проникновение электронов в твердые тела, формирование потоков обратно рассеянных и вторичных электронов (раздел 1.1). Рассмотрены также методы анализа многослойных образцов с помощью ОРЭ (раздел 1.2). Автором сделан удачный выбор из огромного числа работ, относящихся к взаимодействию электронов с твердым телом и методах исследования, основанных на анализе разнообразных откликов твердых тел на воздействие электронов. В целом, обзор литературы достоин высокой оценки.

Глава 2 (Экспериментальные методы, (28 стр.). Основным инструментом, которым пользовался автор при проведении экспериментальных исследований был современный многоопциальный нанолитограф со скрещенными лучами на базе Carl Zeiss CrossBeam 1540XB. Уже одно это позволяет отнести диссертационную работу Ложкина М.С. прежде всего к разряду современных исследований в области науки о поверхности, а также, учитывая потенциальное практическое применение ее результатов – к области нанотехнологий. В этой главе достаточно подробно описаны основная установка, встроенные компоненты (масс-спектрометр и др.), а также – различные режимы работы, при которых формировались и исследовались углеродные структуры на поверхности. Описаны достаточно сложные и трудоемкие методики предобработки и формирования подложек моно- и полислойных образцов различного состава, включая тонкие пленки, методика получения поперечных срезов и соответствующий инструментарий. Последний использовался, в том числе, для контроля качества поверхности и поперечных срезов исследуемых образцов. Это, например, атомно-силовой микроскоп. В экспериментах и при синтезе образцов использовалось разнообразное современное оборудование, соответствующее решаемым в диссертационной работе задачам. Все это также свидетельствует о высоком мастерстве автора как экспериментатора.

Глава 3 (Теоретические методы исследования, 10 стр.) посвящена сравнительному описанию подходов к моделированию упругого и неупругого рассеяния электронов в твердых телах. Здесь же описаны некоторые возможности программного пакета *CASINO*, которые использовались при моделировании (см. последний абзац текста на стр. 66 – «Программный пакет *CASINO* 2.48 предоставляет возможность следить за *И далее по тексту...* В рамках данного исследования мы ограничились рассмотрением поверхностной плотности тока и т.д.». Вместе с тем на стр. 60 приведено следующее

высказывание: «Для более глубокого понимания процессов электронного рассеяния нам показалось целесообразным создать собственный программный продукт *Electron Scattering . BSE (ESBSE)*». (см. также раздел 3.2, стр. 59) **Для меня осталось неясным как соотносятся пакеты CASINO и ESBSE. Имеет ли пакет ESBSE. патентные перспективы? Разъясните, пожалуйста.**

Глава 4 (Результаты и их обсуждение, 40 стр.) хорошо структурирована,. Она начинается с представления экспериментальных результатов и основанного на них механизма формирования углеродных структур двух типов –«наностобиков» (радел 4.1) и «нанокоец» (раздел 4.2). Далее в том же ключе рассматривается связь между размерами области эмиссии ОПЭ и толщиной и структурой двух- и полислоиных материалов (разделы 4.2.1 и 4.2.2 соответственно). В разделе 4.3. рассмотрены перспективы нанотомографии на основе исследованных в работе явлений. Представлено также сопоставление полученных результатов с таковыми, основанными на измерении силы тока ОПЭ (радел 4.3). В этой главе представлены все результаты работы, на основании которых сделаны выводы (см **Заключение**) и сформулированы защищаемы положения (см. **Введение**). Из полученных результатов и сделанных Ложкиным М.С. выводов хотелось бы, особо отметить, во-первых, сделанный на основании экспериментальных результатов и подтвержденный моделированием вывод о том, что плотность твердого тела является основной физической характеристикой, определяющей форму и протяженность облака обратно рассеянных электронов на его поверхности (Защищаемое положение 3, стр. 7, Заключение, пп 3, стр. 131) . Во-вторых, - предложенный и апробированный оригинальный метод глубинного зондирования многослойных образцов (Заключение, пп 4, см. также рис. 4.53, раздел 4.2.3)

В целом диссертационная работа Ложкина М.С. , оцениваемая как научный труд и как квалификационная работа заслуживает самой высокой оценки. Вместе с тем, она не лишена недостатков, которые делает чтение текста не простым занятием, как и работу с pdf-версией диссертации, в которой не функционируют простейшие опции, например «Поиск». Могу предположит, что автор не задумывался о том, как его текст будет восприниматься потенциальными пользователями диссертации, а это многочисленное профессиональное сообщество - от студента до оппонента. К сожалению, в тексте встречаются незавершенные высказывания и разрывы в изложении описываемого и обсуждаемого материала. Другая, мягкая характеристика подобных недостатков – «Текст плохо отредактирован». Пример – рис. 4.17. Подпись под рисунком: «Масс-спектр остаточных газов в камере образцов РЭМ, который демонстрирует присутствие углеводородов в составе атмосферы». Пропустим распространенную терминологическую вольность, - «атмосферу (газовая оболочка небесных тел) камеры образцов». Но почему под абсциссой написано «Масса вторичных ионов, а.е.м.»? **Почему вторичных ионов?** Режим ВИМС? Здесь , видимо, использовался штатный режим работы масс-спектрометра Hiden Analytical HAL 7 RC, относящегося к типу RGA (Residual Gas Analyzer). К тому же возникает вопрос по существу: **Что в используемой вакуумной системе является**

источником последовательного (C4-C10) ряда непредельных углеводородов? Про использовании масс-спектрометрии говорится в разделе 2.1 (Описание экспериментальной установки, стр. 42). Однако почему-то там, а не в разделе 4 приводится интересный и важный результат, а именно оценка парциальных давлений углеводородов, но голословно. **Вопрос: Как проводилась оценка парциальных давлений углеводородов?**

Разумеется, отмеченные выше замечания не затрагивают выводы и защищаемые положения диссертации. Считаю, что она заслуживает положительной оценки.

Диссертация Ложкина Максима Сергеевича на тему «Обратное рассеяние электронов средних энергий в твердых телах и их влияние на процессы индуцированного осаждения углеводородо», 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 обнаружены

Член диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,
профессор кафедры фотоники СПбГУ



В.К. Рябчук

26.10.2023