

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Лобановой Лидии Григорьевны на тему «Электронная спектроскопия и спектроскопия рассеяния легких ионов низких энергий в задачах выбора материалов, обращенных к плазме» по специальности 1.3.5. Физическая электроника

Диссертационная работа Лобановой Л.Г. посвящена созданию новых методов анализа поверхностей твердых тел, основанных на спектроскопии рассеяния легких ионов низких энергий, спектроскопии пиков упруго отраженных электронов и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Данные методы анализа основаны на решении обратной задачи рассеяния частиц на твердых телах, которая относится к классу некорректных задач математической физики. Существенным плюсом диссертации является вывод теоретических формул, которые позволяют быстро и достаточно точно рассчитывать спектры рассеянных частиц, что ускоряет процесс решения обратных задач путем перебора. Разработанные методики автор применяет к задачам анализа материалов «первой стенки» термоядерных реакторов. Взаимодействие заряженных частиц с твердым телом находит широкое применение для анализа поверхности твердых тел, технологиях обработки поверхности, таких как модифицирование и легирование поверхности, имплантация и ионный миксинг и многое другое. Воздействие низкоэнергетических ионов водорода, его изотопов и гелия на материалы «первой стенки» термоядерных реакторов является серьезной научной и инженерной проблемой. Поэтому **актуальность** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, его цель и задачи, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе** представлен обзор существующих аналитических методик описания процесса рассеяния легких ионов и электронов на твердых телах. Указаны границы применимости каждого из подходов. Приведен обзор методов ионного и электронного анализа поверхности твердых тел.

Во **второй главе** выполнен вывод уравнений упругого и неупругого переноса частиц в твердом теле. Методом инвариантного погружения Амбарцумяна в малоугловом приближении решена граничная задача для уравнения упругого переноса частиц, решением которой является распределение рассеянных частиц по длине пробега. Полученное решение апробировано на основе сравнения с результатами моделирования методом Монте-Карло

для случая рассеяния протонов с энергией 10 кэВ от различных мишеней. Получено хорошее совпадение результатов численного моделирования и аналитических расчетов.

В **третьей главе** построена методика расчета энергетических и угловых распределений электронов, отраженных от однородных однокомпонентных и многокомпонентных мишеней, а также для слоисто-неоднородных мишеней. Методика основана на методе парциальных интенсивностей – свертке решения граничной задачи для уравнения упругого переноса частиц, построенного во второй главе, и решения граничной задачи для уравнения неупругого переноса – решения Ландау. На основе разработанного аналитического описания построена методика расшифровки спектров спектроскопии пиков упруго отраженных электронов и спектроскопии отраженных электронов, позволяющие определять послойные профили изотопов водорода в мишенях. Представлены расчеты энергетических спектров отраженных электронов и проведено сравнение с экспериментальными данными.

В **четвертой главе** представлено аналитическое описание процесса рассеяния легких ионов от твердых тел, основанное на решении, полученном во второй главе. Получены аналитические выражения, описывающие дифференциальные и интегральные характеристики рассеяния легких ионов с учетом и без учета процесса перезарядки. Результаты аналитических расчетов сравниваются с результатами численного моделирования и экспериментальными данными для широкого интервала начальной энергии потока легких ионов, различной геометрии рассеяния и для мишеней с различными атомными номерами. Получено хорошее совпадение аналитических расчетов и результатов численного моделирования, что показывает применимость развитой аналитической методики описания энергетических спектров рассеянных легких ионов для использования при расшифровке спектров ионной спектроскопии анализа твердых тел.

В **пятой главе** представлена методика описания энергетических спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в широком интервале потерь энергии фотоэлектронов. Методика основана на решении граничной задачи с внутренними источниками для уравнения упругого переноса электронов методом инвариантного погружения Амбарцумяна. Представленная методика апробирована путем сравнения с результатами численного моделирования распределений по длине пробега фотоэлектронов в мишени и экспериментальными угловыми распределениями фотоэлектронов. Представлена методика восстановления дифференциального сечения неупругих потерь энергии электронов из РФЭС спектров. Разработанная методика расшифровки энергетических спектров РФЭС и восстановления дифференциального сечения неупругих

потерь энергии электронов позволила изучить влияние воздействия плазмы на поверхность вольфрамовых и графитовых материалов.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Положения, выносимые на защиту, четко сформулированы и подтверждены представленными в работе результатами, **достоверность** которых подтверждается апробированной методологией исследования, отсутствием противоречий с литературными данными и хорошим согласованием аналитических расчетов с экспериментальными результатами и результатами численного моделирования.

Отдельно хочется отметить высокую научную квалификацию соискателя, которая профессионально владеет методами классической математической физики, что ярко продемонстрировала при решении граничных задач для интегро-дифференциальных уравнений переноса частиц.

Несмотря на общую высокую оценку работы, следует сделать ряд замечаний:

1. В тексте диссертации термины «рассеяние ионов» и «отражение ионов» используется практически как равнозначные, что не совсем корректно. Отражение (например, зеркальное) – это возвращение ионов из приповерхностного слоя с сохранением преимущественного направления движения, в то время как рассеяние характеризуется изменением направления движения ионов после столкновения с атомами поверхности, приводящим к широкому угловому распределению.

2. Учитывая современный уровень развития расчетных методик и вычислительных мощностей, целесообразно более детально сравнить возможности разработанного аналитического подхода с возможностями компьютерного моделирования рассеяния ионов и электронов. В частности, рассмотреть сложные неоднородные поверхности с релаксацией, реконструкцией, наличием некоторого рельефа, адсорбатов и нанокластеров. Также интересно узнать мнение автора, что надо улучшить в существующих методах моделирования.

3. По мнению оппонента, некоторые из сделанных в диссертации утверждений целесообразно переформулировать в более мягкой форме, например: «Проблема первой стенки является наиболее актуальной проблемой установок УТС» или «Разработанная в работе аналитическая теоретическая модель отражения легких ионов от твердых тел позволит решить проблему первой стенки множества перспективных энергетических установок». Также по мнению оппонента «постановка цели и задач исследования» является скорее прерогативой научного руководителя, нежели отражением личного вклада автора.

4. В диссертации иногда встречаются неудачные речевые обороты, такие как: «разработанная в работе» и «спектров спектроскопии».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.5. Физическая электроника (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лобанова Лидия Григорьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Официальный оппонент

13.04.26

доктор физико-математических наук, доцент

И.К. Гайнуллин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,
Физический факультет, кафедра физической электроники, доцент

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет.

Тел. +7 (916) 632-35-48; E-mail: ivan.gainullin@physics.msu.ru