

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».

Однако, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа, представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, выполнена на высоком научном уровне. В диссертации изложены защищаемые положения, выводы и рекомендации, обоснованность, достоверность и новизна которых подтверждается оригинальными публикациями автора, согласием результатов моделирования с экспериментальными данными.

Диссертация Лобановой Лидии Григорьевны полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в Положении о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а её автор - Лобанова Лидия Григорьевна безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Официальный оппонент

12.04.2026

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.; E-mail: ivan.gainullin@physics.msu.ru

Подпись



И.К. Гайнуллин завершено

Наче
отдела