

## 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 аналитического описания процесса отражения легких ионов и электронов от твердых тел и его применению для расшифровки спектров в методах анализа поверхности твердых тел, основанных на ионном и электронном рассеянии. **Актуальность работы** обусловлена использованием рассеяния потоков легких ионов и электронов для анализа материалов термоядерных установок, а также их применением для биомедицины, микро и наноэлектроники.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, его цель и задачи, степень разработанности темы, приведен объект и предмет исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология диссертационного исследования, степень достоверности полученных результатов и личный вклад автора.

В **первой главе** представлен обзор существующих аналитических методик описания процесса отражения легких ионов и электронов от твердых тел. 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 отраженных частиц по длине пробега. Полученное решение апробировано на основе сравнения с результатами моделирования методом Монте-Карло для случая отражения 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 послонные профили изотопов водорода в мишенях. Представлено множество расчетов энергетических спектров отраженных электронов и сравнение с экспериментальными данными.

**В четвертой главе** представлено аналитическое описание процесса отражения 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 аналитического расчета сравнены с результатами численного моделирования и экспериментальными данными для широкого интервала начальной энергии потока легких ионов, различной геометрии рассеяния и для мишеней с различным атомным номером. Все представленные результаты сравнения показали хорошее соответствие. Показана применимость развитой аналитической методики описания энергетических спектров отраженных 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 (до 100 эВ). Методика основана на решении граничной задачи с внутренними источниками для уравнения упругого переноса электронов методом инвариантного погружения Амбарцумяна. Представленная методика апробирована на основе сравнения с результатами численного моделирования пробеговых распределений и экспериментальными угловыми распределениями фотоэлектронов, вышедших в вакуум без неупругих потерь энергии. Получено хорошее соответствие. 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, а именно, исследовать электронную структуру материалов до и после воздействия стационарной гелиевой плазмы на установке ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) и дейтериевой плазмы токамака EAST.

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

**Научная новизна** работы заключается в ряде ключевых результатов: впервые разработана аналитическая теоретическая модель описания процессов многократного

рассеяния легких ионов от твердых тел, справедливая для широкого интервала энергии зондирующего пучка легких ионов (от сотен эВ до десятков кэВ) и для любой геометрии рассеяния, а также применимая для описания процесса рассеяния в случае, когда остаточный пробег легких ионов соизмерим с транспортной длиной пробега; разработана методика расчета интенсивностей пиков электронов, упруго отраженных от многокомпонентных мишеней, позволяющая учитывать процесс многократного упругого рассеяния электронов в твердом теле и определять послойные профили изотопов водорода в твердых телах; разработана методика расчета энергетических спектров фотоэлектронов в интервале потерь энергии, включающим как пик, сформированный фотоэлектронами, вышедшими в вакуум без неупругих потерь энергии, так и область потерь энергии размером порядка 100 эВ, что является инструментом восстановления дифференциального сечения неупругих потерь энергии электронов и позволяет анализировать аллотропный состав исследуемых твердых тел. **Положения, выносимые на защиту**, четко сформулированы и подтверждены представленными в работе результатами, **достоверность** которых обеспечена использованием фундаментального аналитического аппарата, многократно апробированной методологией и внутренней согласованностью. **Теоретическая ценность** работы определяется ее вкладом в фундаментальную науку, расширяя понимание процессов отражения легких ионов и электронов низких энергий от твердых тел и предоставляя возможность аналитического описания данных процессов. Ее **практическая ценность** заключается в применении разработанных аналитических методик для расшифровки сигналов методов ионной и электронной спектроскопии анализа твердых тел.

Тем не менее, хотелось бы отметить следующие замечания:

1. На странице 32 автор пишет «Главным недостатком ТДС является тот факт, что с помощью данного метода возможно исследование только сорбированного водорода (не связанного)». Это утверждение неверно. ТДС-анализ успешно применяется в том числе и для анализа химически-связанного водорода в материалах.
2. На странице 33 автор утверждает, что метод ядерных реакций является разрушающим из-за возможной эрозии поверхности ионами высоких энергий. С ростом энергии ионов, особенно при переходе в сотни и тысячи кэВ, коэффициент распыления и, как следствие, эрозия поверхности, стремятся к нулю. Эрозия поверхности представляет гораздо большую проблему для методов MEIS, а для исследования лёгких элементов и для LEIS.
3. На рисунке 2.3 приводится сравнение с данными численного моделирования, при этом не приводится достаточно данных о самом моделировании, таких как название кода, верифицирован ли он, статистика (и, как следствие, погрешность), использованная при Монте-Карло моделировании.

4. На рисунке 3.10 для метода дискретных ординат результат расчётов даёт аномалию в области нуля градусов, не воспроизводимую другими методами. С чем она связана и является ли она физической?
5. В работе предлагается аналитическая модель описание энергетических спектров рассеяния лёгких ионов, но не поясняется - что именно подразумевается под лёгкими ионами и что ограничивает массу ионов в модели.
6. Судя по всему, в разработанной методике предполагается, что мишень идеально гладкая. Для поверхностей, подвергавшихся интенсивному плазменному воздействию, таких как обращённые к плазме элементы термоядерного реактора, это не так – шероховатость вольфрамовой облицовки стенки ИТЭР составляет  $\sim 1$  мкм. Может ли автор оценить применимость полученных результатов, особенно описанных в главе 3, если поверхность исследуемой мишени шероховата? Известно, что при анализе спектров рассеяния высоких энергий (метод Обратного рассеяния Резерфорда и метод обратного эластичного рассеяния) шероховатость поверхности учитывать приходится, так как она существенно влияет на форму спектра
7. В главе 4, на страницах 103-104 представлены энергетические спектры отраженных протонов, посчитанные по формуле, выведенной в работе. Утверждается, что эти результаты интерпретируют эксперимент из работы [120]. Экспериментальные кривые на том же графике не приводятся, непонятно, что имеется ввиду под «интерпретацией». Утверждение о неприменимости приближения прямолинейных траекторий в области средних энергий зондирующих ионов чересчур сильно. Утверждение на странице 102 «Возможно, авторы данной работы намеренно использовали логарифмический масштаб с целью скрыть очевидные расхождения» на взгляд оппонента некорректно.
8. На странице 108 сказано, что «Результаты расчета угловых распределений суммарной по зарядовому составу плотности потока протонов... демонстрируют абсолютно верное качественное и удовлетворительное количественное описание экспериментальных данных». На рисунке 4.9 для  $\beta = 40^\circ$  видно систематическое большое занижение расчётного угла рассеяния по сравнению с экспериментом. Чем автор объясняет такое занижение и что считает «удовлетворительным количественным описанием»?

Указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования, не влияют на ее выводы, а носят скорее характер пожеланий и рекомендаций для дальнейшей работы. Работы Лобановой Л.Г. хорошо известны специалистам, опубликованы в ведущих журналах, результаты докладывались на конференциях. Автореферат диссертации точно и в полной мере отражает ее содержание. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом

имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту 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, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Подводя итог, следует заключить, что диссертация Лобановой Л.Г. представляет собой объемное, многоаспектное и методологически самосогласованное исследование, характеризующееся теоретической глубиной, новизной и практической значимостью. Лобанова Л.Г. демонстрирует профессиональное владение методами математической физики. Таким образом, соискатель Лобанова Л.Г. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории  
физико-химических процессов в стенках  
термоядерных установок института  
Лазерных и Плазменных технологий  
«Национального исследовательского ядерного  
университета «МИФИ»

КРАТ Степан Андреевич

Контактные данные:

тел.: \_\_\_\_\_, e-mail: [sakrat@mephi.ru](mailto:sakrat@mephi.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.08 Физика плазмы

Адрес места работы:

115409, Москва, Каширское ш., д. 31

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

институт Лазерных и Плазменных технологий

Тел: +7 (495) 788-56-99, e-mail [laplas@mephi.ru](mailto:laplas@mephi.ru)



07 АПР 2026