

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Бабенко Павла Юрьевича
«Торможение, рассеяние и распыление при
столкновениях атомов кэВ-энергий с твёрдым телом»,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических
наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника»

Диссертационная работа Павла Юрьевича Бабенко посвящена углубленному анализу процессов взаимодействия атомов с энергиями до 100 кэВ с поверхностью твёрдых материалов. В то время, как для описания взаимодействия ионов МэВных энергий зачастую применим простейший кулоновский потенциал, в случае ионов с энергиями порядка долей -десятков кэВ картина становится значительно сложнее, а для описания взаимодействия, как правило, используются различные вариации экранированного кулоновского потенциала. Основная цель проведённого исследования – расширение теоретических знаний о механизмах торможения, рассеяния и распыления в таких столкновениях.

Актуальность темы обусловлена растущими потребностями в развитии методов ионной имплантации для создания миниатюрных электронных устройств, для модификации свойств материалов, методов физического распыления для травления поверхности и формирования тонких плёнок, методов рассеяния для анализа состава поверхности облучаемых материалов. Наконец, крайне актуальна задача моделирования поведения материалов в экстремальных условиях, таких как стенки термоядерных реакторов, где эрозия обращённых к плазме материалов под воздействием потоков в том числе кэВных частиц ведёт помимо прочего к загрязнению плазмы, что играет критическую роль в энергобалансе реактора.

В своей работе Павел Юрьевич провёл систематическое компьютерное моделирование взаимодействия атомов кэВных энергий с твёрдым телом с использованием методов Монте-Карло и молекулярной динамики, как с помощью существующих, так и собственноручно написанных компьютерных кодов. В работе описан алгоритм работы созданной программы, на которую получено свидетельство о государственной регистрации. Рассмотрены различные механизмы неупругих потерь. Показано, что применявшееся приближение $dE/dx \sim \sqrt{E}$ и модели неупругих потерь, в частности Фирсова и Оена-Робинсона, могут быть некорректными в области энергий менее 10 кэВ, так как необходим учёт перестройки электронных оболочек при атомных столкновениях. Проведено сравнение вклада различных элементарных процессов в электронное торможение и предложена модель для расчёта тормозных потерь с учётом автоионизации.

Автором показано, что при определении тормозной способности на основе экспериментальных данных прохождения атомов через тонкие фольги в области низких энергий (менее 10 кэВ) корректно применять не толщину плёнки, а среднюю длину траектории атомов, так как такой учёт даёт лучшее согласие с

данными обратного рассеяния и подтверждается компьютерным моделированием, согласно которому средняя длина траектории атомов и толщина плёнки начинают сильно расходиться в области низких энергий.

Проведено определение параметров потенциала взаимодействия ионов с твёрдым телом на основе экспериментальных данных, проведён расчёт потенциалов взаимодействия для различных систем на основе теории функционала плотности (DFT).

С учётом разработанных моделей для учёта упругих и неупругих потерь Павел Юрьевич провёл расчёт коэффициентов отражения и распыления атомов для мишеней из W и Be, и H, D, T, He, Be, C, N, O, Ne, Ar, W в качестве налетающих частиц. Предложена модель для оценки коэффициента распыления различных атомов, рассматривающая в качестве доминирующего механизма распыление потоком обратно рассеянных бомбардирующих частиц, что справедливо для случая бомбардировки лёгкими частицами тяжёлой мишени. На основе статистической обработки многочисленных экспериментальных данных предложена формула для оценки энергетического порога распыления для различных масс бомбардирующих частиц и мишени.

Полученные автором результаты многократно докладывались на международных конференциях и опубликованы в пятидесяти статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, Scopus, Web of Science.

Несмотря на значительные достоинства работы, можно отметить некоторые вопросы:

1. В описании шестой главы в автореферате предлагается для сильно неровной поверхности использовать модель «сферического» поверхностного потенциального барьера, а для гладкой поверхности – модель «плоскостного» потенциала. На приведённом рисунке 6.2. расчёт коэффициента отражения для сферического барьера даёт более высокое значение, чем плоскостного. При этом из экспериментальной практики известно, что при рассеянии на гладкой поверхности кэВных частиц коэффициент отражения выше, чем при рассеянии на шероховатой.
2. В тексте не обсуждаются возможные отличия реальных экспериментов от представленных моделей. В частности, поверхность Be и W может быть покрыта оксидным слоем, который может восстанавливаться за счет потока кислородосодержащих молекул на поверхность даже в высоком вакууме. Не обсуждается точность и возможный разброс экспериментальных данных, чтобы его можно было соотнести с разбросом значений, который дают модели.

Указанные недостатки не умаляют значимости и не влияют на положительное мнение от представленной работы. Диссертация «Торможение,

рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» представляет собой завершённую работу, выполненную автором на высоком уровне и отвечающую всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а ее автор, Бабенко Павел Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Гаспарян Юрий Микаэлович,
доктор физико-математических наук
по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы»,
Заведующий кафедрой «Физика плазмы»
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

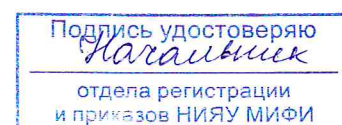
E-mail: ymgasparyan@mephi.ru

Телефон: +7 495 788-5699 доб. 9983

24.03.2026



A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'А. Саул', written over a horizontal line.



В. М. Саулороева