

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03.25

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 2 апреля 2026 г. № 5

О присуждении Бабенко Павлу Юрьевичу
гражданину Российской Федерации,
ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» по специальности 1.3.5 – «физическая электроника» принята к защите 4 декабря 2025 г., протокол № 1, диссертационным советом ФТИ 34.01.03.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01.02-153, прил. 3 от 15 июля 2025 г.

Соискатель Бабенко Павел Юрьевич, 16 мая 1976 года рождения, в 1999 году окончил магистратуру в Санкт-Петербургском техническом университете по направлению подготовки «техническая физика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.04 «физическая электроника» в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В настоящее время соискатель работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории атомных столкновений в твердых телах ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Борисов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры 1203 Московского авиационного института, предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 6 замечаний.

2. Девдариани Александр Зурабович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, предоставил положительный отзыв на диссертацию, замечаний не содержит.

3. Карасев Платон Александрович, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 6 замечаний.

Ведущая организация – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания. Отзыв подготовили Белокуров В.В., доктор физико-математических наук, профессор, и.о. декана Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Черныш В.С., доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Гайнуллин И.К. доцент этой же кафедры. Отзыв утвердил Федянин А.А., доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, проректор МГУ им. М.В. Ломоносова.

В отзыве ведущей организации указано, что диссертация написана в четком и ясном стиле, содержание автореферата соответствует тексту диссертации. Диссертация П.Ю. Бабенко «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком уровне и соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 со всеми дополнениями и изменениями и Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а сам Павел Юрьевич Бабенко, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что МГУ им. М.В. Ломоносова является одним из ведущих университетов России. Кроме того, в МГУ им. М.В. Ломоносова действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 50 публикациях, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о

присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Полный список публикаций представлен в диссертации и автореферате.

На автореферат поступило 4 отзыва.

1. Отзыв доктора физико-математических наук Гаспаряна Юрия Микаэловича, заведующего кафедрой «Физика плазмы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», отзыв положительный, содержит 2 замечания:

- 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.

- в тексте не обсуждаются возможные отличия реальных экспериментов от представленных моделей. В частности, поверхность Ве 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.

2. Отзыв доктора физико-математических наук Бачурина Владимира Ивановича, профессора базовой кафедры нанотехнологий в электронике ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», положительный, замечаний не содержит.

3. Отзыв доктора физико-математических наук Тетельбаума Давида Исааковича, ведущего научного сотрудника лаборатории физики и технологии тонких пленок отдела твердотельной электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского физико-технического института (НИФТИ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», отзыв положительный, содержит 4 замечания:

- классификация ионов по энергиям, базирующаяся только на абсолютных её значениях, является не адекватной: характер физических процессов взаимодействия ионов с веществом лучше коррелирует с величиной приведенной энергии. Замечу, что специалисты по ионной имплантации обычно относят диапазон 10-100 кэВ к средним, а не малым энергиям.

- утверждение о том, что «данных при малых энергиях столкновений очень мало» (если имеются в виду данные по потерям энергии при прохождении атомных частиц через вещество) не соответствует действительности. Эти данные могут быть почерпнуты из многочисленных публикаций по глубине проникновения и профилям распределения имплантируемых ионов. В частности, экспериментальные данные о пробегах ионов и их зависимости от энергии могут служить для проверки адекватности полученных межатомных потенциалов. Эти данные также позволяют проверить правильность вывода о показателе степени в формуле зависимости электронных потерь от энергии ионов.

- полученные методом молекулярной динамики данные позволяют заметить тенденцию к отклонению асимптотического поведения полученной кривой от кривых, полученных другими расчетными методами, и также отклонение от экспериментальной кривой. Это отклонение не упоминается в автореферате.

- в качестве пожелания: была бы весьма полезной публикация наиболее важных результатов работы в зарубежных изданиях; это увеличило бы их мировую известность.

4. Отзыв доктора физико-математических наук Пронина Игоря Петровича, ведущего научного сотрудника лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма ФТИ им. А.Ф. Иоффе положительный, замечаний не содержит.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» были получены следующие основные результаты:

1). Предложена новая модель торможения ионов средних масс кэВ-энергий, учитывающая доминирующий вклад в неупругие потери образования автоионизационных состояний при столкновениях атомов. Предложены скейлинги для оценки сечений образования автоионизационных состояний с вакансиями в К, L и M оболочках сталкивающихся атомов.

2). Достигнуто количественное описание основных механизмов образования электронов с непрерывным энергетическим распределением при столкновениях атомов вследствие динамической ионизации и оже-переходов в квазимолекуле.

3). С применением методов компьютерного моделирования показано, что различие данных измерений электронных потерь энергии, полученных методом обратного рассеяния и методом прохождения пучка через тонкую пленку, связано с влиянием многократности столкновений на длину траектории частиц в твердом теле. При энергиях менее 10 кэВ традиционное

определение тормозной способности как потери энергии на единице длины проективного пробега неприменимо.

4). Рассчитаны потенциалы межатомного взаимодействия в рамках теории функционала плотности и ядерные тормозные способности для этих потенциалов для 48 систем. Обнаружено наличие дополнительного пика в зависимости сечения ядерных тормозных потерь от энергии соударения, связанного с рассеянием на потенциальной яме.

5). Впервые определены параметры потенциала для системы ион-твердое тело из экспериментальных данных по многократному рассеянию протонов на мишени из золота и прохождению частиц через пленку золота. Предложена модель, описывающая влияние электронов металла на изменение экранировки потенциала, что позволило достичь согласия с экспериментом.

6). Проведено сравнение вкладов различных элементарных процессов в сечения электронного торможения для случаев p-He и p-Ar. Показано, что количественного соответствия сечения тормозных потерь сумме вкладов ионизации, возбуждения и перезарядки можно добиться, если учесть значительное влияние кинетической энергии быстрых эмитируемых электронов в тормозные способности.

7). Рассчитаны значения коэффициентов отражения и распыления для большого числа ионов с мишенями из Be и W, перспективных материалов для токамака-реактора. Получены энергетические спектры, угловые распределения и средняя энергия распыленных частиц.

8). Траекторные расчеты рассеяния частиц в случае поверхностного каналирования позволили описать эффект радужного рассеяния и получить информацию об амплитудах тепловых колебаний поверхностных атомов и потенциалах взаимодействия для систем Ar-Al(111), Ar-Ag(111), Ne, Ar, Kr-Al(001).

9). Предложена модель распыления твердотельных мишеней легкими частицами, описывающая поведение коэффициента распыления различных материалов и средней энергии распыленных частиц, в том числе в припороговой области. Модель рассматривает механизм распыления поверхностных слоев потоком обратно рассеянных бомбардирующих частиц. Этот механизм оказывается доминирующим при распылении твердотельных мишеней легкими частицами. Получена формула, позволяющая провести экспресс-оценку положения энергетического порога распыления.

10). Разработан пакет программ, позволяющий моделировать рассеяние частиц на поверхности твердого тела,хождение частиц через тонкие пленки, пробеги частиц, распыление материалов и характеристики распыленных частиц при ионной бомбардировке. В частности, применение компьютерного моделирования позволило получить результаты, перечисленные в пунктах 3-9.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Предложенные автоионизационный механизм торможения частиц и поправки в потенциал взаимодействия атомов в твердом теле, а также уточнение данных об электронных и ядерных тормозных способностях позволяют более достоверно описывать атомные столкновения в твердом теле, моделировать пробеги частиц, энерговыделение, образование дефектов и ионную имплантацию.

2. Полученные значения коэффициентов отражения и распыления для большого числа ионов с мишенями из Be и W позволяют более точно оценивать процессы в пристеночной плазме токамака-реактора.

3. Количественное описание непрерывной составляющей в спектрах электронов, образующихся при атомных столкновениях, позволяет точнее интерпретировать результаты диагностики материалов методами оже-спектроскопии.

4. Предложенная модель распыления твердого тела легкими частицами, справедливая в том числе в припороговой области энергий и полученная на ее основе формула позволяют провести экспресс-оценку положения энергетического порога распыления.

Достоверность результатов обеспечена сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными и с расчетами других научных групп. Также проводилось сравнение расчетов в приближении парных взаимодействий с расчетом методом молекулярной динамики, сравнение расчетов показало их хорошее согласие. Результаты исследований были обсуждены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына, ННГУ имени Н.И. Лобачевского, ЯрГУ им. П.Г. Демидова, РГРТУ имени В.Ф. Уткина и докладывались автором на целом ряде всероссийских и международных конференций. В том числе автором было сделано на этих конференциях 3 приглашенных доклада. Основная часть материалов диссертации опубликована в ведущих российских и международных научных журналах, в том числе в обзоре в УФН. Все это позволяет считать представленные результаты обоснованными, достоверными и отвечающими современному мировому уровню научных исследований.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что: Столкновения атомных частиц (атомов, ионов) имеют место в различных лабораторных устройствах и явлениях природы, что ведет к необходимости их всестороннего изучения. Существенные успехи современной физики связаны с исследованием взаимодействия пучков заряженных частиц с твердым телом и многочисленными приложениями пучковых технологий для создания новых материалов и диагностики твердого тела.

Ионная имплантация используется для введения примесей в полупроводниковые кристаллы для изготовления электронных приборов. При

больших дозах внедрения становится возможным превращение поверхностного слоя в другое химическое соединение. Для целого ряда металлов с помощью ионной бомбардировки можно провести электрохимическую пассивацию поверхности. Другими возможными областями применения ионной имплантации являются: повышение критической температуры сверхпроводника, увеличение твердости металлов, изготовление световодов. Возможность использования ионной имплантации для модификации полупроводниковых материалов и металлов вызвала большой интерес исследователей к данной проблеме, что привело к развитию представлений о взаимодействии частиц с твердым телом.

Распыление материалов при ионной бомбардировке используется для очистки и послойного травления поверхностей, для изготовления тонких пленок, для анализа поверхности, а также в распылительных ионных источниках.

Исследования рассеяния налетающих частиц твердыми мишенями имеют большое теоретическое и прикладное значение. При энергиях частиц 100 кэВ – 2 МэВ они широко используются при анализе поверхностного слоя глубиной 500 нм методом спектроскопии резерфордовского рассеяния ионов (РРИ). При энергиях частиц ~1 кэВ метод спектроскопии медленных рассеянных ионов (СМРИ) позволяет с высокой чувствительностью исследовать состав поверхностного монослоя. Рассеяние водорода играет важную роль в рециклинге водорода в термоядерных устройствах.

Атомные и молекулярные физические процессы играют существенную роль в нагреве, охлаждении, потерях, диагностике и моделировании высокотемпературной плазмы. Распыление, обратное рассеяние и имплантация оказывают решающее воздействие на стенки термоядерных устройств и плазменных установок. Важной проблемой является повреждение конструкционных материалов ядерных реакторов под действием атомных частиц. В термоядерном реакторе первая, вакуумная, стенка камеры подвергается воздействию интенсивных потоков различного рода излучений. Взаимодействие излучений с материалами первой стенки приводит к изменению физических и механических свойств последних и к загрязнению плазмы.

Эффекты, происходящие при взаимодействии частиц с твердым веществом и плазмой, широко используются в корпускулярной диагностике лабораторной и космической плазмы. Элементная база космических приборов (микросхемы), подвергаются воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов. Необходимо разрабатывать электронику, которая устойчиво работает в условиях интенсивного радиационного облучения. В медицине пучки протонов высокой энергии успешно используются для терапии онкологических заболеваний.

В последние годы исследования столкновений атомных частиц с твердым телом интенсивно развиваются в России и во всем мире, что часто связано с недостаточным пониманием физики происходящих явлений, отсутствием соответствующих моделей и с несогласием предсказаний имеющихся теорий с экспериментом, что важно для многочисленных приложений. В настоящее время в развитие этой области науки вносят вклад достижения многочисленных исследовательских групп, опубликованные в престижных международных изданиях и представленные на многочисленных международных конференциях (ICACS, ISI, IBA и др).

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Новая модель торможения ионов средних масс кэВ-энергий, учитывающая доминирующий вклад в неупругие потери образования автоионизационных состояний при столкновениях атомов. Скейлинги для оценки сечений образования автоионизационных состояний с вакансиями в К, L и M оболочках сталкивающихся атомов.

2. Непрерывная составляющая в спектрах электронов, образующихся при столкновениях атомов средних масс, обусловлена переходами электронов в континуум с выдвигающихся термов и оже-переходами в квазимолекуле.

3. Влияние многократности столкновений на различие результатов измерений электронных потерь энергии при столкновениях ионов и атомов с твердым телом методом обратного рассеяния и методом прохождения пучка через тонкую пленку. При энергиях менее 10 кэВ традиционное определение тормозной способности как потери энергии на единице длины проективного пробега неприменимо.

4. Соотношение вклада процессов перезарядки, возбуждения и ионизации в электронные тормозные способности при столкновениях р-He и р-Ar. Значительный вклад (50-60%) кинетической энергии эмитируемых быстрых электронов в тормозные способности.

5. Результаты расчетов ядерных тормозных способностей для 48 систем при использовании DFT потенциалов. Наличие дополнительного пика в зависимости сечения ядерных тормозных потерь от энергии соударения, связанного с рассеянием на потенциальной яме.

6. Потенциалы для столкновений атомных частиц в твердом теле, полученные из анализа данных по многократному рассеянию протонов на мишени из золота и прохождению частиц через пленку золота. Значительное отличие этих потенциалов от потенциалов, применяемых для описания рассеяния в газовой фазе, обусловлено заметным увеличением константы экранирования. Аналитические формулы для потенциалов, учитывающие изменение экранировки при столкновениях частиц в металле.

7. Значения коэффициентов отражения и распыления для ионов H, D, T, Be, C, N, O, Ne, Ar, W в широком диапазоне энергий 10-105 эВ на мишенях из Be и W, рассматриваемых как перспективные материалы для токамак-реактора.

8. Модель распыления легкими частицами твердотельных мишеней для расчета коэффициента распыления и средней энергии распыленных частиц, в том числе в припороговой области. Аналитическое выражение для экспресс-оценки положения энергетического порога распыления.

Личное участие автора заключается в том, что все основные результаты, выносимые на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основополагающий вклад. Это относится к постановке задач исследования, численному моделированию и анализу результатов компьютерного моделирования. В частности, лично автором проведены расчеты энергетических спектров электронов при распаде вакансий в квазимолекуле, ядерных тормозных потерь, решена проблема различия данных об электронных тормозных потерях при измерении различными методами, созданы теоретические модели автоионизационного механизма торможения частиц, распыления материалов легкими атомами, предложена формула для порога распыления. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад соискателя был определяющим. На защиту вынесены только те положения и результаты, в получении которых роль автора была ведущей.

Консультации в этих работах оказывали профессор Андрей Петрович Шергин (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), д.ф.-м.н. Александр Николаевич Зиновьев (ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Помощь в исследованиях оказывали к.ф.-м.н. Михайлов В.С. и Тенсин Д.С.

Основные результаты диссертационной работы были представлены автором на следующих профильных международных и всероссийских конференциях: XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» - ВИП (Ярославль - 2013, 2021, 2023, Москва - 2015, 2017, 2019); 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 Международная конференция Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами - ФВЗЧК (Тулиновская конференция) 2017, 2018, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024 – Москва; 26, 27, 28, 29 International conference on atomic collisions in solids – ICACS – 2014 – Debrecen, Hungary, 2016 – Lanzhou, China, 2018 – Caen, France, 2022 – Helsinki, Finland; International Conference on Advances and Applications in Plasma Physics (AAPP 2019) – 2019 – Saint-Petersburg, Russia; 24 International conference on ion beam analysis (IBA) – 2019 – Antibes, France; XXVII Конференция взаимодействие плазмы с

поверхностью (ВПП) – 2024 Москва; VIII, IX Всероссийская конференция и школа молодых ученых и специалистов Физические и физико-химические основы ионной имплантации (ФФХОИИ) – 2022 – Казань, 2024 – Нижний Новгород.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов по специальности 1.3.5 – «физическая электроника», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0, мнение установить (выявить) не удалось – 0.

На заседании 2 апреля 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Бабенко П.Ю. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «физическая электроника».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Г.С. Курскиев

2 апреля 2026 г.