

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук Новикова Николая Викторовича
на тему «Сечения перезарядки и распределения по зарядам в пучках
ускоренных ионов, проходящих через газообразные и твердые мишени»
по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника»**

Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которой она представляется к защите

Диссертация посвящена теоретическому рассмотрению процессов изменения зарядового состояния быстрых ионов, пучки которых сформированы средствами ускорительной техники, в газовых и твердотельных средах, а также созданию моделей и теории для описания распределения по зарядам ионов, движущихся в таких средах, имеющих различные толщины и плотности. Данное исследование относится к актуальным направлениям современной физики взаимодействия ускоренных заряженных частиц с различными материалами, обеспечивающим успешное развитие многих важных отраслей производственной сферы, включая микро-, нано-, и оптоэлектронику, радиационную и космическую технику, радиационную медицину и ускорительную технику. Диссертация полностью соответствует отрасли физико-математических наук и специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Актуальность темы

Развитие физики взаимодействия ускоренных ионов с материалами обеспечила появление таких современных технологий, как: ионно-лучевое легирование материалов, ионная металлургия, трековые микро- и нанотехнологии, дефектно-примесная инженерия в материаловедении, создание радиационноустойчивых материалов для ядерной энергетики и космической техники и др. В связи с этим проблемам прохождения ионных

пучков в различных средах, процессам изменения зарядового состояния ионов при взаимодействии с атомами вещества, энергетическим потерям и пробегам ионов во всем мире в течение многих десятилетий уделяется огромное внимание. В эти исследования были вовлечены и вовлекаются сейчас наиболее талантливые физики ведущих стран мира. Появление новых сфер практического применения пучков быстрых ионов, расширение диапазона энергий ионов требует радикального улучшения теоретического базиса для описания процессов взаимодействия ионных пучков с различными средами и особенно точности в описании зарядовых распределений ионов по мере их прохождения в веществе. В качестве примера можно привести две проблемы, которые были выявлены в последние 10-15 лет в связи с использованием ионных пучков с энергиями порядка 1-10 МэВ/нуклон для высокоэнергетической ионной имплантации (элементы силовой микроэлектроники, многоуровневая микроэлектроника) и трековых нанотехнологий. В используемых теоретических подходах для описания профилей концентрации внедряемых в твердые тела ионов по глубине полагается сечение электронного торможения пропорциональным квадрату среднего эффективного заряда ионов. В этом случае распределения концентрации внедренных атомов и созданных радиационных дефектов описываются функциями Пирсона 4-го типа с высокой отрицательной асимметрией. Эксперименты же демонстрируют распределения с положительной асимметрией с шириной распределения в 1,5-6 раз, превышающей теоретическую. Только с учетом перераспределения потока движущихся ионов в твердом теле на различных глубинах не только по энергиям и углам, но и по зарядам, удалось адекватно описать экспериментальные результаты. Учет флуктуации зарядового состояния быстрых ионов в твердых телах позволил сформулировать и объяснить механизм формирования прерывистых треков. Приведенная выше информация и эти примеры иллюстрируют высокую актуальность темы диссертации Н.В.Новикова.

**Степень новизны полученных результатов и научных положений,
выносимых на защиту**

В диссертации впервые:

- разработан метод расчета сечений захвата электронов быстрыми ионами в газах, базирующийся на численном интегрировании выражения для амплитуды захвата электрона с учетом кулоновского отталкивания между налетающим ионом и остатком атома мишени. Это обуславливает уменьшение времени взаимодействия иона с атомом мишени и приводит к уменьшению сечения захвата электрона налетающим ионом. Последнее обстоятельство позволило значительно улучшить согласие теоретических и экспериментальных данных для сечений захвата электрона. Показана необходимость учета захвата электрона в возбужденные состояния при вычислениях в широком диапазоне энергий и зарядов ядра ионов;

- предложен метод аппроксимации решения уравнения Хартри-Фока, позволивший получить в аналитическом виде волновые функции возбужденных состояний более 150 атомов и ионов с зарядами ядра $2 \leq Z \leq 18$ и количеством электронов от 2 до 18;

- разработана модель учета влияния плотности среды на сечение потерь и захвата электронов ионами в твердом теле, применяемая в широком диапазоне изменения энергии столкновений, заряда ядра иона и атома мишени. Это позволило определять не только параметры и зарядовые фракции ионов в равновесном распределении, но и неравновесные зарядовые распределения ионов при прохождении их в тонких пленках, а также потери энергии быстрых ионов в процессах перезарядки;

- создана база данных, содержащая экспериментальные и теоретические значения сечений потери и захвата электронов ионами, а также равновесные зарядовые распределения ионов в пучке при их прохождении в твердых телах и газах;

- создана компьютерная программа для расчета параметров ионных пучков при их взаимодействии с различными материалами, позволяющая вычислять сечения потери и захвата электронов ионами с энергией от 0,01 до

20 МэВ/нуклон и зарядами ядер от 5 до 18. Программа позволяет также вычислять сечения потери и захвата двух электронов, параметры равновесного зарядового распределения ионов в пучке, а также потери энергии ионов в процессах перезарядки. Вклад потерь энергии в процессах перезарядки в общие неупругие потери энергии существенен для энергий ионов $E < 1$ МэВ/нуклон, увеличивается при уменьшении заряда ядра иона. Для ионов бора при $E \approx 0,1$ МэВ/нуклон этот вклад составляет $13 \div 15\%$;

- установлен механизм формирования равновесного зарядового распределения ионов в пучке, связанный с соотношением между зарядом падающих ионов и значением среднего заряда ионов в равновесном зарядовом распределении. С увеличением энергии ионов на входе в мишень, глубина в мишени, на которой устанавливается равновесное распределение ионов по заряду, возрастает. Это обусловлено уменьшением сечений потери и захвата электронов с увеличением энергии ионов.

Все указанные результаты являются новыми и оригинальными, что подтверждается соответствующими публикациями и докладами на тематических конференциях.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, выводов, защищаемых положений и рекомендаций обеспечена:

- использованием современных теоретических методов и подходов к описанию процессов взаимодействия быстрых ионов с атомами среды, процессов перезарядки ионов в веществе;

- согласием результатов расчета с использованными многочисленными экспериментальными данными;

- хорошим соответствием результатов расчета с результатами теоретических работ других авторов и результатами, полученными с использованием известных в мире компьютерных программ SRIM, CASP и PASS.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Развитые подходы вычисления сечений перезарядки и созданная компьютерная программа позволяют теоретически исследовать новые закономерности процессов ион-атомного взаимодействия и прохождения ускоренных ионов в газообразных и твердых средах. Этот теоретический базис позволяет также определить влияние процессов захвата и потери двух электронов на зарядовые распределения ионов, а также рассчитать вклад процессов перезарядки в общие неупругие потери энергии в широком диапазоне энергий ионов и зарядов ядер ионов и атомов мишени.

Практическая значимость результатов диссертации определяется их потенциальным широким использованием при разработке технологий трековой микро- и нанoeлектроники, в ускорительной технике, для моделирования радиационной стойкости элементной базы космической электроники, в радиационной медицине.

Полнота опубликованности результатов

Основные результаты работы достаточно полно рассмотрены в 34 статьях, опубликованных в рейтинговых международных журналах и журналах России, а также трудах 28 международных конференций.

Соответствие научной квалификации соискателя искомой степени

На основании тщательного ознакомления с текстом диссертации и автореферата и критериями, определенными Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова, с научными публикациями автора можно с уверенностью утверждать, что диссертация соответствует требованиям к докторским диссертациям по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Замечания:

- наряду с учетом эффекта плотности среды на сечения перезарядки и неупругие потери энергии ионов было бы целесообразным определить или оценить роль перераспределения электронной плотности валентных

электронов в твердых телах в соответствии с типом связи атомов в твердых телах: ковалентная, ионная, металлическая. Заметная роль этого эффекта экспериментально наблюдалась в неупругих потерях энергии ионов с энергией $E \leq 1$ МэВ/нуклон;

- название главы 1 «Обзор методов оценки распределения ускоренных ионов по зарядам» не совсем соответствует материалу. Глава в основном посвящена методам расчета сечений потери и захвата электронов;

- автор строго доказал, что с ростом энергии ионов установление зарядового равновесия наступает медленнее, т.е. на большей глубине. Однако, его заключение о том, что толщина мишени, необходимая для установления равновесного зарядового распределения в ионном пучке, увеличивается также при возрастании заряда ядра иона Z , по-моему, не убедительно. Ведь с ростом Z возрастают и сечения потери и захвата электронов;

- в качестве пожелания для будущих исследований можно рекомендовать автору рассмотреть проблемы процессов перезарядки ионов в режиме каналирования их в кристаллах, когда плотность электронов в каналах сильно уменьшается, а заряд ионов оказывается «сильно замороженным»;

- имеется и небольшое число стилистических и орфографических ошибок в тексте диссертации: например, в ссылке [74] отсутствует название статьи, отсутствует символ V – том. В ссылках на книги при указании числа страниц в англоязычной литературе приводится обычно обозначение pp., а не просто p. Целесообразно было бы таблицы данных (стр. 158-170) текста вынести в Приложение, так как пояснение к ним в тексте занимает незначительный объем.

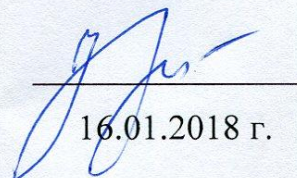
Вместе с тем, указанные замечания не касаются защищаемых положений, выводов и рекомендаций. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом им. М.В.Ломоносова к докторским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.20 – «Физика пучков

заряженных частиц и ускорительная техника» по физико-математическим наукам, а также критериям, определенным п.п.2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова, а диссертация оформлена согласно приложениям №5,6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Новиков Н.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий лабораторией элионики НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ

Комаров Фадей Фадеевич


16.01.2018 г.

Контактные данные:

раб. тел.: +375(17)2124833, моб. тел.: +375(29)7750059

e-mail: komarovf@bsu.by

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.04.07 – «Физика твердого тела».

Адрес, место работы: НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ, лаборатория элионики
ул. Курчатова, 7

220045, г. Минск, Республика Беларусь,

тел.: +375(17)2124906; e-mail: niipfpf@bsu.by

Подпись сотрудника

