

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кислова Константина Сергеевича «Резонансные процессы неадиабатического обмена энергии электронов и фотонов с молекулярными ионами в плазме инертных газов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика»

Диссертация К.С.Кислова посвящена теоретическому исследованию столкновительных и радиационных процессов, происходящих с участием молекулярных и квазимолекулярных ионов в низкотемпературной плазме инертных газов. Рассмотрены, в частности, следующие процессы: диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов с электронами; резонансный и нерезонансный трехчастичный захват электронов атомарными ионами в присутствии нейтральных атомов; резонансное тушение ридберговских состояний атомов в столкновениях с атомами, находящимися в основном состоянии; резонансное диссоциативное возбуждение молекулярных ионов электронами; фотодиссоциация молекулярных ионов; фотопоглощение на свободно-свободных переходах квазимолекулярных ионов. Под резонансными процессами в диссертации понимаются столкновительные и радиационные процессы, сопровождающиеся неадиабатическим обменом энергией между внешней частицей (электроном или фотоном) и внутренними электронами, составляющими электронную подсистему молекулярного или квазимолекулярного иона.

Хорошо известно, что присутствие в плазме даже крайне малых концентраций молекулярных ионов может приводить к резкому изменению релаксационных, рекомбинационных и радиационных свойств плазмы. Молекулярные ионы играют значительную роль в релаксации заряда в планетарных и звездных атмосферах. Изучение столкновительных и радиационных процессов, происходящих с участием молекулярных катионов, представляет интерес для оптики низкотемпературной плазмы, лазерной физики, спектроскопии, а также фотохимии ранней Вселенной. Исследованию указанных процессов посвящено значительное количество недавних теоретических и экспериментальных работ. Благородные газы и их смеси являются одними из наиболее часто используемых сред для создания

плазмы в лабораторных условиях. Исходя из этого, тематика диссертационной работы К.С.Кислова является актуальной.

Важная особенность диссертации заключается в том, что перечисленные процессы рассматриваются в физических условиях, при которых оказывается возбужденным огромное количество колебательно-вращательных уровней молекулярного иона. Подобные условия зачастую возникают в эксперименте при возбуждении плазмы в разряде или электронным пучком. В частности, такая ситуация зачастую реализуется в активных средах газовых лазеров и источников ВУФ-излучения, функционирующих на базе смесей инертных газов. Вследствие значительного числа состояний, учитываемых при этом для описания динамики рассматриваемых в диссертации реакций, теоретические данные по сечениям и константам скорости процессов, необходимые для моделирования работы указанных устройств, крайне ограничены. Соответственно, полученные в работе К.С.Кислова результаты имеют научную и практическую значимость для прикладных задач оптики и лазерной физики, а также для решения ряда фундаментальных проблем атомной и молекулярной спектроскопии и физики низкотемпературной плазмы.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация включает в себя введение, шесть глав основного текста, заключение и список литературы и изложена на 172 страницах.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность исследования, описан личный вклад автора, обсуждена степень достоверности полученных результатов и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описаны рассматриваемые в работе неадиабатические радиационные и столкновительные реакции разрушения молекулярных ионов. Обсуждаются ключевые столкновительные процессы захвата и связанно-связанных переходов с участием атомов в ридберговских состояниях, перечислены основные свойства ридберговских атомов. Дан краткий обзор текущего состояния исследований перечисленных процессов и приведено описание основных теоретических методов их описания.

Обсуждаются трудности, возникающие при теоретическом моделировании данных процессов в низкотемпературной плазме инертных газов, возбуждаемой импульсными разрядами или электронным пучком.

Во второй главе представлен оригинальный теоретический подход для описания нерезонансных процессов трехчастичного захвата электронов в ридберговские состояния атомов при столкновении с атомами буферного газа. В рамках импульсного приближения и модифицированной теории эффективного радиуса выведены выражения для эффективного сечения и константы скорости указанного процесса.

В третьей главе рассматриваются неадиабатические процессы захвата электронов в ридберговские состояния атомов в результате диссоциативной рекомбинации и резонансного трехчастичного захвата при столкновениях с участием нейтральных частиц. Эти процессы описываются с помощью единого теоретического подхода, основанного на квазиклассическом рассмотрении динамики неадиабатических переходов. Получены полуаналитические выражения для констант скорости и сечений процессов. Проведен сравнительный анализ данных процессов захвата в условиях равновесия по ядерному движению. Установлен доминирующий вклад резонансных трехчастичных процессов в заселение ридберговских состояний атомов инертных газов в случае, если энергия диссоциации молекулярных ионов мала ($D_0 \sim 0.1$ эВ). Проведено сравнение расчетов констант скорости диссоциативной рекомбинации ионов Ne_2^+ и Ar_2^+ с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других работ, продемонстрировано количественное и качественное согласие сравниваемых результатов. Показано, что процессы столкновения с участием нейтральных частиц вносят существенный вклад в заселение ридберговских уровней при степенях ионизации плазмы вплоть до $x \lesssim 10^{-5}$.

В четвертой главе модифицирован теоретический подход из Главы 3 для описания резонансного тушения при столкновениях с нейтральными частицами. Исследована роль резонансного тушения в заселении ридберговских состояний в сравнении с традиционными механизмами связанно-связанных переходов при столкновениях с электронами или нейтральными частицами. Показано, что при наличии в плазме умеренно и сильно-связанных (квази)молекулярных ионов резонансный процесс вносит

определяющий вклад в кинетику релаксации плазмы в условиях, характерных для плазмы послесвечения и плазмы, возбуждаемой электронным пучком.

В пятой главе предложен теоретический подход к единому описанию диссоциативной рекомбинации и прямого диссоциативного возбуждения молекулярных ионов электронным ударом. Для объяснения экспериментальных данных по коэффициентам диссоциации гомоядерных ионов инертных газов разработана теоретическая модель, в которой выделены три ключевых канала разрушения: диссоциативный захват на низколежащие уровни, диссоциативный захват на ридберговские состояния и диссоциативное возбуждение.

В шестой главе приведены численные расчеты эффективных сечений и констант скорости резонансных радиационных процессов фотодиссоциации ионов и свободно-свободных переходов в криптоновой плазме. Установлено, что свободно-свободные фотопереходы вносят существенный вклад в результирующий коэффициент фотопоглощения при температурах $T \gtrsim 3000$ К.

В заключении сформулированы результаты диссертации.

Наиболее существенные результаты работы:

- Теоретическое описание ранее не изученного резонансного трехчастичного механизма захвата электрона на ридберговские уровни атома в присутствии атома в основном состоянии.
- Полученные формулы для сечений и констант скорости реакции процессов диссоциативной рекомбинации и диссоциативного возбуждения молекулярных ионов в столкновениях с электронами в условиях, когда значительный вклад в динамику процессов вносит весь колебательно-вращательный квазиконтинуум иона.
- Установленные в работе диапазоны электронной и газовой температуры, соответствующие преобладанию каждого из рассматриваемых процессов в плазме смесей инертных газов, и зависимость этих диапазонов от энергии диссоциации молекулярных ионов.

- Температурные зависимости коэффициентов фотопоглощения с учетом вклада поглощения на свободно-свободных переходах.

Диссертация написана понятным языком и хорошо оформлена.

По диссертации целесообразно высказать следующие замечания:

1. Полученные в разделах 2, 3 и 5 формулы носят общий характер. При их выводе практически не используется специфика плазмы инертных газов. В диссертации никак не обсуждается применимость полученных выражений для других классов систем. Соответствующее обсуждение могло бы значительно увеличить ценность результатов работы.
2. Разделы 3.3.2 и 5.2-5.3 содержат несколько идентичных формул. Неясно, зачем автору потребовалось во второй раз вводить одни и те же характеристики.
3. В тексте диссертации, а также в подписи к рисунку 5.7а сказано, что расчеты проводились при энергии электрона, равной 1.5 эВ. Напротив, на самом рисунке указана энергия 0.15 эВ. При какой именно энергии налетающего электрона выполнялись расчеты?

Данные недостатки имеют уточняющий и рекомендательный характер, и потому не снижают общую высокую оценку работы К.С.Кислова.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне. Полученные К.С.Кисловым результаты являются новыми и представляют интерес для специалистов в области атомной и молекулярной спектроскопии, физики низкотемпературной плазмы и физики газовых лазеров. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием самосогласованного теоретического подхода, а также согласием полученных результатов с экспериментальными данными и теоретическими результатами других авторов. Надежность расчетов, выполненных в работе К.С.Кислова, подкрепляется применением современных вычислительных методов и актуальных спектроскопических данных. По весьма обширному объему материала и цитируемых работ представленная диссертация вполне может служить основой монографии по соответствующей тематике.

Основные результаты работы опубликованы в 8 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, в перечень ВАК, а также в 11 тезисах российских и международных конференций.

Аннотация диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Диссертация Кислова Константина Сергеевича «Резонансные процессы неадиабатического обмена энергии электронов и фотонов с молекулярными ионами в плазме инертных газов» полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а также паспорту специальности 01.04.05 – «Оптика». Считаю, что К.С.Кислов заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Официальный оппонент
Доктор физ.-мат. наук, профессор,
начальник лаборатории теории
излучения отдела теории плазмы
Курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»


Лисица Валерий Степанович

«19» ноября 2020 г

тел. (499)196-73-34,

e-mail: Lisitsa_VS@nrcki.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Лисицы В.С. заверяю:

Заместитель директора – главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

Николаенко Андрей Владимирович



**Список основных публикаций оппонента
доктора физико-математических наук В.С. Лисицы
по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет**

1. Ильичев, И. В., Крауз, В. И., Левашова, М. Г., Лисица, В. С., Мялтон, В. В., Харрасов, А. М., Виноградова, Ю. В. (2020). Распространение плазменного потока, генерируемого в плазмофокусном разряде, в фоновой плазме. *Физика плазмы*, 46(5), 419-434.
2. Демура, А. В., Леонтьев, Д. С., Лисица, В. С., Шурыгин, В. А. (2020). Статистическая модель квазиконтинуума тяжелых ионов в горячей плазме. *Физика плазмы*, 46(3), 195-205.
3. Астапенко, В. А., Лисица, В. С., Яковец, А. В. (2018). Поглощение ультракоротких лазерных импульсов двухатомными молекулами. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 154(6), 1087-1093.
4. Сдвиженский, П. А., Кукушкин, А. Б., Левашова, М. Г., Жоголев, В. Е., Леонов, В. М., Лисица, В. С., Коновалов, С. В. (2018). Оценка эффектов мультиплетного расщепления и запираания линейчатого излучения при тушении разряда интенсивной инжекцией аргона в ИТЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*, 41(4), 5-13.
5. Демура, А. В., Леонтьев, Д. С., Лисица, В. С., Шурыгин, В. А. (2017). Радиационные потери альфа-частиц на тяжелых ионах в термоядерной плазме. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 106(7), 417-421.
6. Демура, А. В., Леонтьев, Д. С., Лисица, В. С., Шурыгин, В. А. (2017). Статистические скорости диэлектронной рекомбинации многоэлектронных ионов в плазме. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 152(4), 781-798.