

Отзыв

официального оппонента д.ф.-м.н. Бычкова Владимира Львовича 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»

Физические процессы, происходящие с участием молекулярных ионов, играют принципиальную роль в целом ряде фундаментальных и прикладных задач оптики, лазерной физики, спектроскопии и кинетики низкотемпературной плазмы, химической физики, а также физики планетарных и звездных атмосфер. Изучению реакций, сопровождающихся образованием и распадом молекулярных катионов, в настоящее время посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ. Особый интерес представляют при этом различные резонансные процессы, протекающие в результате неадиабатического обмена энергией между налетающими электронами и фотонами, а также электронными подсистемами молекулярных и квазимолекулярных ионов.

Актуальность диссертации. В диссертации К.С.Кислова выполнено теоретическое исследование и численный анализ ряда резонансных радиационных и столкновительных процессов, происходящих в лабораторной плазме с участием молекулярных ионов инертных газов. Рассмотренные в работе процессы включают в себя фотодиссоциацию, диссоциативную рекомбинацию и диссоциативное возбуждение молекулярных ионов электронным ударом. Наряду с этим, в диссертации изучены ранее не исследованные резонансные процессы неадиабатического обмена энергии электронов и фотонов при их взаимодействии с атомарными ионами и атомами буферного инертного газа, которые сопровождаются образованием квазимолекулярных ионов в ходе столкновения частиц. Тема диссертации К.С. Кислова несомненно актуальна и представляет интерес для широкого круга прикладных задач, включая разработку мощных инфракрасных лазеров с оптической накачкой на инертных газах, а также для решения ряда фундаментальных проблем атомной и молекулярной спектроскопии.

Оригинальность диссертации. Основным результатом работы является выполненный анализ относительной эффективности различных резонансных процессов, происходящих в плазме смесей инертных газов, и полученные

данные о физических параметрах плазмы, соответствующих преобладанию того или иного процесса. Значительный интерес представляет также установленный в диссертации факт того, что в случае умеренносвязанных и сильносвязанных квазимолекулярных ионов ($D_0 \gtrsim 0.1 - 1$ эВ) инертных газов при заселении уровней $n \lesssim 15$ резонансные трехчастичные процессы преобладают над традиционным механизмом тройной рекомбинации в столкновениях со свободными электронами в широком диапазоне параметров плазмы. Данное обстоятельство показывает, что ранее не изученный канал резонансного трехчастичного захвата должен приниматься во внимание при описании динамики и кинетики столкновительных процессов в низкотемпературной плазме смесей инертных газов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 172 страницы текста, в том числе 31 рисунок и 188 наименований в списке литературы.

Во **введении** автор обосновывает актуальность, научную новизну, научную и практическую ценность работы, достоверность полученных результатов, формулирует защищаемые положения и свой личный вклад.

В **Главе 1** дана классификация ключевых столкновительных процессов захвата и связанно-связанных переходов с участием ридберговских атомов в лабораторной низкотемпературной плазме, возбуждаемой импульсными разрядами или электронным пучком. Также обсуждаются резонансные неадиабатические процессы, приводящие к разрушению молекулярных ионов инертных газов BA^+ , в частности, диссоциативное возбуждение молекулярных ионов электронным ударом, а также резонансные радиационные процессы фотодиссоциации и свободно-свободные переходы. Представлено краткое описание основных теоретических подходов, используемых для моделирования перечисленных процессов.

Глава 2 посвящена разработке оригинального теоретического подхода для описания традиционного нерезонансного механизма трехчастичного захвата электронов атомарными ионами при столкновениях с атомами буферного газа. С помощью этого подхода, основанного на использовании импульсного приближения в сочетании с модифицированной теорией эффективного радиуса для рассеяния медленных электронов, получены простые аналитические и полу-аналитические выражения для эффективных

сечений и констант скоростей исследуемого процесса. Особое внимание уделено анализу применимости выведенных аналитических выражений.

В Главе 3 излагается теоретический подход и алгоритм расчета сечений и констант скоростей диссоциативной рекомбинации и резонансного трехчастичного захвата электронов на ридберговские уровни. Данный подход основан на использовании квазиклассического приближения для матричных элементов оператора взаимодействия, а также приближения квазинепрерывного спектра колебательно-вращательных состояний. Автором получены простые полуаналитические выражения для сечений и констант скоростей исследуемых процессов в условиях сильного возбуждения nJ -состояний. Состоятельность используемого теоретического подхода продемонстрирована путем сравнения результатов расчета сечений диссоциативной рекомбинации ионов Ne_2^+ и Ar_2^+ с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными. Выполнено исследование резонансных процессов захвата в случае гетероядерных (ArXe^+ и NeXe^+) ионов инертных газов. Автором показан колоколообразный характер зависимости сечений и констант скоростей резонансных процессов захвата (для максвелловского распределения функции распределения электронов по энергиям) от главного квантового числа и установлена сильная зависимость положения максимумов от параметров термов молекулярных ионов.

В Главе 3 также выполнен сравнительный анализ эффективности ранее не изученного резонансного процесса трехчастичного захвата электронов атомарными ионами и традиционного механизма захвата электронов на ридберговские состояния атомов при столкновениях со свободными электронами плазмы. При этом показано, что в случае умеренно связанных и сильно связанных ионов ($D_0 \approx 0.1 - 1$ эВ) резонансные трехчастичные процессы вносят определяющий вклад в заселение состояний атомов инертных газов с $n \lesssim 15$ даже при степенях ионизации плазмы порядка 10^{-5} .

В Главе 4 диссертации рассмотрены резонансные связанно-связанные переходы между ридберговскими уровнями при столкновениях с нейтральными частицами буферного газа. Для теоретического описания этих процессов автор использует подход, аналогичный представленному в Главе 3. Выполнено сравнение резонансных связанно-связанных переходов с традиционным механизмом тушения атомов при столкновениях со свободными электронами. В диссертации показано, что резонансное тушение

вносит основной вклад в заселение ридберговских уровней $n \lesssim 15$ при степенях ионизации плазмы до $\alpha \lesssim 10^{-6}$.

Глава 5 посвящена исследованию резонансного диссоциативного возбуждения гетероядерных (ArXe^+ и NeXe^+) и гомоядерных (Xe_2^+ и Kr_2^+) ионов электронным ударом. Для теоретического описания использовался подход, схожий с приведенным в Главе 3 подходом для описания диссоциативной рекомбинации. Для умеренно- и сильносвязанных ионов продемонстрирован пороговый характер рассматриваемого процесса в зависимости от электронной температуры. Ключевым результатом главы 5 является выяснение доминирующего вклада диссоциативного возбуждения в разрушение молекулярных ионов инертных газов при электронных температурах $T_e \gtrsim 10000$ К.

В **Главе 6** изложены результаты расчетов эффективных сечений и коэффициентов поглощения света в процессах неадиабатического обмена энергии фотонов с молекулярными ионами инертных газов Kr_2^+ . Наряду с фотодиссоциацией здесь рассмотрены ранее не изученные радиационные свободно-свободные переходы. Основным результатом данной главы является проведенный сравнительный анализ эффективностей указанных радиационных процессов в широком диапазоне температур $T \sim 300 \div 15000$ К. Автором показано, что вклад неадиабатических свободно-свободных переходов в результирующий коэффициент фотопоглощения становится существенным при температурах $T \gtrsim 3000 - 5000$ К.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Наиболее важные и интересные результаты, полученные в диссертации:

- Разработан теоретический подход и созданы численные алгоритмы для расчета сечений и констант скоростей диссоциативной рекомбинации и резонансного диссоциативного возбуждения в условиях сильного возбуждения колебательно-вращательных состояний молекулярных ионов. Проведены соответствующие численные расчеты этих величин, а также коэффициентов фотодиссоциации для гомоядерных (Ar_2^+ и Xe_2^+) и гетероядерных (ArXe^+ и NeXe^+) ионов инертных газов в условиях, характерных для лабораторной низкотемпературной плазмы смесей инертных газов. Установлены основные закономерности в зависимости указанных величин от температур электронной и ионной компонент

плазмы ($T_e = 100 - 80000$ К, $T = 100 - 15000$ К), а также от значения энергии диссоциации иона D_0 в диапазоне от 30 мэВ до 1 эВ.

- Впервые исследованы эффективные резонансные механизмы свободно-свободных фотопереходов и резонансного трехчастичного захвата электронов в ридберговские состояния при столкновениях атомов и ионов инертных газов.
- Проведено сравнение эффективности резонансного трехчастичного процесса захвата с традиционным механизмом тройной рекомбинации при столкновениях со свободными электронами. Показано, что в случае ионов с энергией связи $D_0 \gtrsim 0.1 - 1$ эВ резонансные процессы вносят доминирующий вклад в заселение уровней атомов инертных газов с $n \lesssim 15$ даже при степенях ионизации плазмы $\alpha \lesssim 10^{-5}$.
- Получены новые данные по сечениям и константам скоростей захвата электронов на фиксированные ридберговские уровни n атомов инертных газов в результате диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов и резонансного трехчастичного захвата электронов атомарными ионами. Выяснена связь между указанными величинами и параметрами электронных термов молекулярных ионов, а также температурами электронной и ионной компонент плазмы. Показано, что в случае гетероядерных ионов инертных газов у сечений и констант скоростей данных процессов имеется максимум по n , положение которого смещается в сторону низких уровней по мере увеличения энергии диссоциации ионов.

Диссертация хорошо оформлена, написана хорошим языком.

По диссертации можно высказать следующие замечания

1. Хорошо известно, и это неоднократно отмечено в диссертации, что ридберговские состояния атома ксенона при малых значениях орбитального квантового числа обладают значительными квантовыми дефектами. В диссертации изложен метод учета данного обстоятельства, однако никак не обсуждается, насколько это влияет на представленные в работе результаты.
2. В диссертации константы скоростей процессов получены путем усреднения сечений по максвелловскому распределению электронов по энергиям (см. Главу 3). Однако на практике приходится иметь дело с газоразрядными системами, в которых распределение электронов по энергиям немасвелловское. Не понятно, насколько величины констант

скоростей для известных немаксвелловских функций распределения или функций распределения для газоразрядных условий будут отличаться от полученных в диссертации.

3. На рисунке 3.10 (а, б) кривая, соответствующая константе скорости нерезонансного захвата электрона в системе $\text{Ar} + \text{Xe}^+ + e$ демонстрирует плато в области $n = 60 - 80$. Природа данного плато не вполне ясна и в диссертации никак не обсуждается.
4. Диссертация написана на русском языке, тем не менее, абсолютно все текстовые надписи на рисунках представлены на английском языке.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общую высокую оценку работы.

Диссертационная работа К.С. Кислова выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых результатов, интересных для широкого круга исследователей, работающих в различных областях физики атомных столкновений, атомной спектроскопии и молекулярной физики. Обоснованность сформулированных в диссертационной работе научных положений и выводов не вызывает сомнения. Представленные в работе результаты получены с использованием внутренне непротиворечивого теоретического подхода, современных вычислительных методов, а также актуальных спектроскопических данных по электронным термам и параметрам молекулярных ионов инертных газов. Достоверность результатов работы подтверждается согласием с существующими результатами расчетов других авторов, полученными в рамках независимых альтернативных подходов, а также с многочисленными экспериментальными данными.

Результаты работы представляют научную и практическую ценность для решения ряда актуальных задач атомной и молекулярной спектроскопии, физики атомных столкновений, а также динамики и кинетики релаксационных и рекомбинационных процессов в низкотемпературных плазмах смесей инертных газов.

К достоинствам диссертации следует отнести большое число полученных аналитических и полуаналитических выражений, четкость и ясность изложения, а также обширность представленных в ней результатов расчетов. Основные результаты работы опубликованы в 8 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, а также в 11 тезисах российских и международных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

На основании текста диссертации можно сделать вывод, что по актуальности, новизне и важности полученных результатов работа 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. Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник
кафедры физической электроники
Физического факультета Московского
Государственного университета
им. М.В.Ломоносова,
доктор физико-математических наук

Бычков Владимир Львович

«17» ноября 2020 г.

119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, физический факультет.
Эл. адрес: bychvl@gmail.com Тел. 8 495 9391787; 7 (916) 025-70-91

Подпись Быčkova Владимира Львовича удостоверяю

Декан физического факультета

доктор физико-математических наук,
профессор



Сысоев Николай Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова»

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом
1, строение 2, Физический факультет, тел.: +7 495 939-16-82
e-mail: info@physics.msu.ru

Список основных публикаций оппонента доктора физико-математических наук В.Л. Бычкова по теме защищаемой диссертации за последние 5 лет:

1. Bychkov, V., Chernikov, V., Deshko, K., Goryachkin, P., Mikhailovskaya, T., Shvarov, A. (2020, June). Interaction of corona discharge plasma with a disperse media. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1560, No. 1, p. 012070. IOP Publishing.
2. Голубков, Г. В., Бычков, В. Л., Арделян, Н. В., Космачевский, К. В., Голубков, М. Г. (2019). Влияние внешнего электрического поля на параметры плазмы нижней ионосферы. *Химическая физика*, 38(7), 23-29.
3. Арделян, Н. В., Бычков, В. Л., Голубков, Г. В. (2018). Влияние грозовой активности на параметры плазмы воздуха в ионосфере. *Химическая физика*, 37(7), 59.
4. Арделян, Н. В., Бычков, В. Л., Голубков, Г. В., Космачевский, К. В. (2018). Параметры плазмы воздуха в нормальных и сейсмических условиях. *Химическая физика*, 37(1), 91-96.
5. Ardelyan, N. V., Bychkov, V. L., Kosmachevskii, K. V. (2017). On electron attachment and detachment processes in dry air at low and moderate constant electric field. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(12), 3118-3124.
6. Ardelyan, N. V., Bychkov, V. L., Kosmachevskii, K. V. (2016). Theoretical analysis of ionization in long-term air discharge plasmas at atmospheric pressure. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(11), 2530-2535.
7. Арделян, Н. В., Бычков, В. Л., Волков, С. А., Космачевский, К. В., Кочетов, И. В. (2015). Предпробойная ионизация воздуха в атмосфере. *Химическая физика*, 34(10), 63.
8. Арделян, Н. В., Бычков, В. Л., Космачевский, К. В., Максимов, Д. С. (2015). Ионизация воздуха в предгрозвых атмосферных условиях. *Успехи прикладной физики*, 3(6), 553-558.