


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ
Российской академии наук
(ИСАН)

ул. Физическая, д. 5, г. Троицк, Москва, 108840
Тел.: 8 (495) 851-05-79, тел./факс: 8 (495) 851-08-86
e-mail: isan@isan.troitsk.ru www.isan.troitsk.ru

20.11.2020 № 11221-02-2171

на № _____ от _____

«Утверждаю»
Директор Федерального
государственного
бюджетного учреждения науки
Института Спектроскопии РАН
д.ф.-м.н., профессор
Задков Виктор Николаевич
ноября 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации 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.

Основной целью диссертационной работы Константина Сергеевича Кислова являлось теоретическое исследование релаксационных, рекомбинационных и диссоциативных процессов, протекающих в результате резонансного взаимодействия электронов и фотонов с внутренними электронами молекулярных ионов. В работе рассматриваются следующие процессы:

- диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов;
- диссоциативное возбуждение молекулярных ионов;
- резонансный трёхчастичный захват электронов;
- фотодиссоциация;
- радиационные переходы в непрерывном спектре выше порога диссоциации.

Исследование динамики этих процессов представляет интерес для ряда задач спектроскопии и кинетики низкотемпературной плазмы, а также астрофизики. В прикладном аспекте изучение указанных процессов важно для работ, связанных с разработкой мощных лазеров с оптической накачкой на инертных газах и источников ВУФ-излучения. Важная особенность рассматриваемых в диссертации процессов состоит в том, что, ввиду резонансного характера, они вносят определяющий вклад в заселение высоковозбужденных состояний атомов в широком диапазоне условий, характерных, например, для астрофизической плазмы, плазмы

импульсного разряда или плазмы смесей инертных газов, возбуждаемой электронным пучком. Таким образом, выбранная в диссертации К. С. Кислова тематика исследований несомненно является актуальной, а результаты диссертации представляют значительный интерес для современной атомно-молекулярной физики, оптики, спектроскопии и кинетики рекомбинации и релаксации энергии электронного возбуждения в лабораторной плазме, а также для целого ряда астрофизических приложений, в том числе к задачам оптики звездных и планетных атмосфер.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Получены выражения для констант скоростей резонансных процессов трёхчастичного захвата электрона и диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов с электронами. Выполнены соответствующие расчеты для ряда гетероядерных (ArXe^+ и NeXe^+) и гомоядерных (Ne_2^+ , Ar_2^+ , Kr_2^+ и Xe_2^+) ионов инертных газов в диапазоне температур $T_e = 300\text{-}10000$ К и $T_i = 300\text{-}1000$ К электронной и ионной компонент плазмы соответственно. Выяснен характер зависимостей эффективных сечений и констант скоростей изучаемых процессов от главного квантового числа n , температур T_e и T_i , а также энергии диссоциации молекулярных ионов.
2. Произведено сравнение вкладов в заселение ридберговских уровней атомов Хе в низкотемпературной плазме смесей инертных газов от процессов диссоциативной рекомбинации гомоядерных Xe_2^+ и гетероядерных R-Xe⁺ ионов.
3. Исследована роль резонансных процессов трёхчастичного захвата при столкновениях с атомами инертного газа для различных значений главного квантового числа. Проведено сравнение эффективностей этих процессов с процессами захвата при тройных столкновениях со свободными электронами. Для сильносвязанных ионов, у которых энергия диссоциации составляет десятые доли эВ, установлено преобладание резонансных трёхчастичных процессов в заселении уровней атомов инертных газов с $n \leq 15$.
4. Получены выражения для константы скорости реакции прямого диссоциативного возбуждения молекулярных ионов электронным ударом в условиях значительного возбуждения колебательной и вращательной степеней свободы. Проведён сравнительный анализ эффективности процессов диссоциативной рекомбинации и диссоциативного возбуждения гетероядерных и гомоядерных ионов инертных газов при изменении электронной температуры в широком диапазоне вплоть до 80000 К. Показано, что в случае слабосвязанных ионов (энергия диссоциации ≤ 0.1 эВ) процесс диссоциативного возбуждения является преобладающим. Установлено, что для

больших энергий диссоциации и высоких температур ($T_e \geq 10000$ К) процесс диссоциативного возбуждения становится доминирующим.

Особое значение имеет результат сравнения теоретических расчётов коэффициентов диссоциативной рекомбинации гомоядерных ионов инертных газов с результатами экспериментов более чем тридцатилетней давности, которые ранее не получили адекватного объяснения.

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

Во введении приведено обоснование актуальности, новизны, практической и научной ценности исследования и достоверности полученных результатов. Здесь также в явном виде сформулированы цели работы и защищаемые положения диссертации; указан личный вклад автора.

В первой главе автор перечисляет рассматриваемые в работе элементарные столкновительные и радиационные процессы с участием высоковозбужденных атомов и атомарных и молекулярных ионов. Дан краткий обзор основных методов теоретического описания перечисленных в данной главе процессов и результатов, полученных другими авторами. Обсуждаются затруднения, возникающие при применении существующих подходов к исследуемым в диссертации системам.

Вторая глава посвящена нерезонансным процессам захвата электронов в высоковозбужденные состояния атомов при столкновении с нейтральными частицами буферного газа. Изложен используемый в работе для описания этих процессов оригинальный теоретический подход, основанный на применении соотношения детального баланса, а также импульсного приближения в комбинации с модифицированной теорией эффективного радиуса для рассеяния медленных электронов. Получены приближённые аналитические формулы для констант скоростей рассматриваемых процессов.

В третьей главе изучаются резонансные процессы захвата электронов в ридберговские состояния атомов инертных газов. Предложен теоретический подход для самосогласованного описания диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов с электронами и процесса резонансного трёхчастичного захвата электронов атомарными ионами в столкновении с нейтральным атомом. Подход основан на применении квазиклассического приближения для матричных элементов неадиабатического перехода и использовании приближения, рассматривающего плотный спектр колебательно-вращательных состояний молекулярных ионов, как непрерывный. Разработанный метод позволил получить выражения для сечений и констант скоростей рассматриваемых процессов в условиях достаточно сильного возбуждения

колебательной и вращательной степеней свободы. В результате проведённых для гетероядерных молекулярных ионов инертных газов расчётов установлены зависимости характеристик резонансных процессов захвата от главного квантового числа. Также в главе 3 проведены расчеты сечений диссоциативной рекомбинации гомоядерных ионов в условиях, характерных для лабораторной низкотемпературной плазмы инертных газов и показано хорошее соответствие результатов расчетов с известными из литературы результатами теоретических и экспериментальных работ. Полученные формулы также позволили впервые провести сравнительный анализ эффективности резонансных процессов диссоциативной рекомбинации и трёхчастичного захвата в низкотемпературной плазме смесей инертных газов. Установлено, что вклад трёхчастичного захвата многократно превосходит вклад диссоциативной рекомбинации в случае, когда энергия диссоциации D_0 молекулярных ионов мала ($D_0 \sim 0.1$ эВ). Дополнительно были сопоставлены вклады в заселение ридберговских уровней атомов резонансного трёхчастичного механизма и традиционного механизма захвата при столкновениях с электронами.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию резонансного тушения ридберговских состояний атомов ксенона при столкновениях с нейтральными частицами. С использованием разработанного в главе 3 теоретического подхода получены выражения для констант скорости рассматриваемого процесса. Дано сравнение эффективности резонансных процессов тушения и традиционных связанно-связанных переходов, вызванных столкновениями с электронами. Определены параметры плазмы смесей инертных газов, при которых необходимо учитывать влияние резонансного тушения на динамику заселения ридберговских состояний.

В пятой главе детально изучены резонансные процессы диссоциативного возбуждения гомоядерных и гетероядерных ионов инертных газов. Для их теоретического описания был предложен подход, аналогичный подходу из третьей главы для описания диссоциативной рекомбинации. На основе численного анализа поведения сечений и констант скоростей сделаны выводы о доминировании канала диссоциативного возбуждения над каналом диссоциативной рекомбинации в плазме инертных газов при высоких электронных температурах $T_e \geq 10000$ К. Показано, что существующие экспериментальные данные могут быть количественно объяснены путем одновременного описания диссоциативного захвата на низколежащие уровни, диссоциативного захвата на ридберговские состояния и диссоциативного возбуждения.

В шестой главе проведен теоретический анализ резонансных радиационных процессов с участием молекулярных ионов Kr_2^+ . Автор включает в рассмотрение фотодиссоциацию и свободно-свободные радиационные переходы, т.е. переходы в непрерывном спектре выше

границы диссоциации. В диссертации показано, что свободно-свободные радиационные переходы вносят большой вклад в полный коэффициент фотопоглощения при газовых температурах выше 3000 К.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В работе К.С. Кислова получен ряд новых научных результатов. В частности, в диссертации развит оригинальный теоретический подход, позволяющий с помощью относительно простых выражений корректно учитывать вклад большого числа (высоко)возбуждённых колебательно-вращательных состояний молекулярных ионов в динамику диссоциативной рекомбинации. Подобный учет в рамках существующих теоретических методов сопряжен с большими вычислительными трудностями. С использованием разработанного подхода в диссертации был выполнен систематический расчет констант скоростей резонансных процессов диссоциативной рекомбинации гетероядерных ионов инертных газов в условиях, характерных для лабораторной низкотемпературной плазмы.

Наиболее существенный новый результат работы К.С.Кислова заключается в теоретическом описании процессов резонансного трёхчастичного захвата электронов на возбужденные уровни атомов. Сравнение данного процесса с традиционными механизмами захвата при тройных столкновениях со свободными электронами плазмы указывает на его доминирующую роль при заселении ридберговских состояний с $n \lesssim 15$ в плазме смесей инертных газов, — даже при степенях ионизации плазмы $\kappa \sim 10^{-5}$.

Значительный интерес представляют также полученные в диссертации результаты по фотопереходам в гомоядерных ионах инертных газов с участием состояний непрерывного спектра. Здесь, в частности, автору удалось впервые исследовать поведение коэффициента поглощения в широком диапазоне температур ионов с учётом переходов, в которых начальными являются состояния не только дискретного, но и непрерывного спектра.

Следует также отметить, что в диссертации дано хорошее количественное объяснение экспериментальных данных по разрушению молекулярных ионов ксенона электронным ударом. Помимо отличного согласия теории и эксперимента, автор предлагает простое объяснение поведения температурной зависимости константы скорости реакции.

В качестве резюме можно сказать, что полученные автором результаты представляют интерес для исследователей в различных областях современной физики высоковозбужденных и

слабосвязанных молекулярных систем, для задач кинетики рекомбинационных и релаксационных процессов в низкотемпературной плазме и для разработки мощных светоизлучающих устройств.

По диссертации следует сделать ряд замечаний.

1. Автор не всегда оправданно использует термин «неадиабатический переход», имея в виду переход между различными электронными молекулярными термами. Между тем, например, для фотодиссоциации этот термин традиционно не используется.
2. Не всегда в контексте поясняется термин «квазимолекула». На наш взгляд, его целесообразно использовать для неустойчивых комплексов или для молекул в возбуждённых преддиссоционных состояниях. Авторы же имеют в виду, если не ошибаемся, весьма краткое нахождение «молекулы» в непрерывном спектре выше границы диссоциации в стадии разлёта.
3. В параграфе 3.6.6 диссертации утверждается, что (цитируем) «при заселении уровней с главным квантовым числом в диапазоне $8 \leq n \leq 20$ в системах KrXe^+ и ArXe^+ эффективность диссоциативного захвата традиционно растёт с уменьшением газовой и электронной температур». Однако из рисунков 3.12a и 3.12d следует, что при некоторых условиях наблюдается обратная зависимость от электронной и газовой температур. Причины данного отклонения в диссертации не обсуждаются.
4. Автор активно пользуется неким приближением для описания колебательно-вращательных уровней молекулярных ионов, для которого он использует термин «квазиконтинуум». Это приближение позволяет получить ряд интересных формул для сечений и констант скоростей изучаемых резонансных процессов. Вместе с тем, в диссертации не представлено каких-либо расчётов, позволяющих оценить точность и оправданность применения данного приближения к описанию рассматриваемых процессов.
5. Используемое на рисунке 5.6b обозначение для полного коэффициента разрушения ионов Xe_2^+ отличается от обозначения из текста диссертации.
6. Вызывает вопросы тот факт, что все 8 журнальных публикаций выполнены в 2020 году. Такой стиль представления результатов не вполне естественен. (Хотя следует в скобках отметить, что качество публикаций весьма высокое и что большинство результатов было ранее доложено на многочисленных конференциях.)

Высказанные замечания носят скорее рекомендательный характер и не снижают общей оценки работы Кислова К.С. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и написана понятным языком. Работа является законченным научным исследованием. В ней получены оригинальные физические результаты, представляющие значительный интерес для специалистов в области физики атомно-молекулярных столкновений, физики низкотемпературной плазмы, оптики и спектроскопии. Диссертация выполнена с использованием самосогласованных теоретических подходов, современных методов атомно-молекулярной физики, а также актуальных данных по кривым потенциальной энергии и спектроскопическим параметрам гомоядерных и гетероядерных ионов инертных газов. Достоверность результатов диссертации подтверждается хорошим согласием расчетов с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными.

Полученные результаты были опубликованы в восьми статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК, а также учитываемых в базах данных Web of Science и Scopus. Они также были доложены в одиннадцати докладах на конференциях в России и за рубежом.

Содержание автореферата правильно отражает основное содержание диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях, проводимых в Институте спектроскопии РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте общей физики РАН, Московском, Санкт-Петербургском и Новосибирском государственных университетах, Московском физико-техническом институте, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте химической физики РАН, РНЦ «Курчатовский институт», а также в целом ряде других научно-исследовательских центров и университетов РФ. Диссертационная работа «Резонансные процессы неадиабатического обмена энергии электронов и фотонов с молекулярными ионами в плазме инертных газов» полностью удовлетворяет требованиям, установленным для кандидатских диссертаций Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Ее автор, Кислов Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - "Оптика".

Доклад Кислова К.С. по материалам диссертации был заслушан на межотдельском семинаре ИСАН 3 ноября 2020 г. Отзыв на диссертацию подготовлен кандидатом физико-

математических наук Медведевым В. В. и доктором физико-математических наук Макаровым А.А. и одобрен на этом семинаре.

Старший научный сотрудник
отдела атомной спектроскопии ИСАН,
кандидат физико-математических наук

Медведев Вячеслав Валерьевич

Тел. 8 (495) 850-20-73

эл.почта: medvedev@isan.troitsk.ru

Главный научный сотрудник
отдела лазерной спектроскопии ИСАН,
доктор физико-математических наук

Макаров Александр Аркадьевич

Тел. 8 (495) 851-08-72

эл.почта: amakarov@isan.troitsk.ru

Исполняющий обязанности заведующего
отделом лазерной спектроскопии ИСАН,
доктор физико-математических наук

Рябцев Александр Николаевич

Тел. 8 (495) 851-02-25

эл.почта: ryabtsev@isan.troitsk.ru

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5

Подписи сотрудников ИСАН В.В. Медведева, А.А. Макарова и А.Н. Рябцева заверяю.

Ученый секретарь
Института спектроскопии Российской академии наук,
к.ф.-м.н.



Кильдиярова Римма Рифовна

Список

публикаций ведущей организации, опубликованных за последние годы по теме диссертации Кислова Константина Сергеевича «Резонансные процессы неадиабатического обмена энергии электронов и фотонов с молекулярными ионами в плазме инертных газов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика» (не более 15)

1. A.Y. Vinokhodov, A.A. Yakushkin, O.F. Yakushev, M.S. Krivokorytov, V.N. Krivtsun, V.V. Medvedev, A.A. Lash, K.N. Koshelev, "A Magnetohydrodynamic System for Pumping Liquid Metal Media in a Plasma Source of Extreme Ultraviolet Radiation", *Instruments and Experimental Techniques*, 62, 2, (2019) 283-288.
2. D.B. Abramenko, P.S. Antsiferov, D.I. Astakhov, A.Y. Vinokhodov, I.Y. Vichev, R.R. Gayazov, A.S. Grushin, L.A. Dorokhin, V.V. Ivanov, D.A. Kim, K.N. Koshelev, P.V. Krainov, M.S. Krivokorytov, V.M. Krivtsun, B.V. Lakatosh, A.A. Lash, V.V. Medvedev, A.N. Ryabtsev, Y.V. Sidelnikov, E.P. Snegirev, A.D. Solomyannaya, M.V. Spiridonov, I.P. Tsygvintsev, O.F. Yakushev, A.A. Yakushkin, "Plasma-based sources of extreme ultraviolet radiation for lithography and mask inspection (50th anniversary of the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences)", *Physics-Uspekhi*, 62, 3, (2019) 304-314.
3. K. Koshelev, A. Vinokhodov, O. Yakushev, A. Yakushkin, D. Abramenko, A. Lash, M. Krivokorytov, Y. Sidelnikov, V. Ivanov, V. Krivtsun, V. Medvedev, D. Glushkov, P. Seroglazov, S. Ellwi, R. Lebert, Debris free high brightness light source based on LPP for actinic EUV microscopy and metrology applications, *Proceedings of SPIE, in International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2018*, K.G. Ronse, E. Hendrickx, P.P. Naulleau, P.A. Gargini, and T. Itani, Editors. 2018.
4. D.B. Abramenko, M.V. Spiridonov, P.V. Krainov, V.M. Krivtsun, D.I. Astakhov, V.V. Medvedev, M. van Kampen, D. Smeets, K.N. Koshelev, "Measurements of hydrogen gas stopping efficiency for tin ions from laser-produced plasma", *Applied Physics Letters*, 112, 16, (2018) 164102.
5. Q. Huang, V. Medvedev, R. van de Kruijs, A. Yakshin, E. Louis, F. Bijkerk, "Spectral tailoring of nanoscale EUV and soft x-ray multilayer optics", *Applied Physics Reviews*, 4, 1, (2017) 011104.
6. A.Y. Vinokhodov, M.S. Krivokorytov, Y.V. Sidelnikov, V.M. Krivtsun, V.V. Medvedev, K.N. Koshelev, "High-brightness EUV source based on laser plasma using a liquid-metal droplet target", *Quantum Electronics*, 46, 5, (2016) 473-480.
7. A.Y. Vinokhodov, K.N. Koshelev, V.N. Krivtsun, M.S. Krivokorytov, Y.V. Sidelnikov, S.V. Medvedev, V.O. Kompanets, A.A. Melnikov, S.V. Chekalin, "Formation of a fine-dispersed liquid-metal target under the action of femto- and picosecond laser pulses for a laser-plasma radiation source in the extreme ultraviolet range", *Quantum Electronics*, 46, 1, (2016) 23-28.
8. A. Dolgov, D. Lopaev, C.J. Lee, E. Zoethout, V. Medvedev, O. Yakushev, F. Bijkerk, "Characterization of carbon contamination under ion and hot atom bombardment in a tin-plasma extreme ultraviolet light source", *Applied Surface Science*, 353, (2015) 708-713.