

На правах рукописи

Когочев Антон Юрьевич

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ
СТОЛКНОВЕНИЯХ АТОМОВ АРГОНА НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Петрозаводск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет»

Научный руководитель: Сысун Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», заведующий кафедрой электроники и электроэнергетики

Официальные оппоненты: Рабинович Александр Львович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт биологии Карельского научного центра российской академии наук», главный научный сотрудник Лаборатории экологической биохимии ИБ КарНЦ РАН

Трухачева Валентина Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», доцент кафедры общей физики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчева РАН (ИНХС РАН), г. Москва

Защита состоится «__» _____ 2013 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д 212.190.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет» по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Петрозаводского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент

В. Б. Пикулев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Столкновения атомов аргона, как с легкими, так и с тяжёлыми частицами являются объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Однако до сих пор наименее изученной остаётся область низких энергий в симметричных столкновениях, то есть область таких энергий соударения частиц, в которой относительная скорость сталкивающихся атомов много меньше скорости атомных электронов. В данной области энергий практически отсутствуют количественные данные об эффективности различных каналов изменения внутренней энергии взаимодействующих частиц, мало исследованы механизмы заселения возбужденных состояний, отсутствуют количественные данные о полных и дифференциальных сечениях возбуждения уровней Ar I с главным квантовым числом $n \geq 4$ и их зависимости от энергии сталкивающихся частиц, практически нет данных о поляризации возбуждаемого излучения, нет теоретических моделей, адекватно интерпретирующих наблюдаемые закономерности. Уточнение представлений о взаимодействии атомов аргона низких энергий необходимо для развития физики плазмы, ее различных приложений, а также представляет значительный интерес для квантовой теории рассеяния и теории строения атома.

Степень разработанности проблемы

Неупругие столкновения между атомами Ar низких энергий исследовались с различных точек зрения. В ранних работах основное внимание уделялось процессам ионизации [1-3]. Более поздние работы посвящены процессам возбуждения при парных столкновениях атомов аргона [4-7].

Цель и задачи диссертационного исследования

Цель диссертации – экспериментальное исследование процессов возбуждения уровней Ag I при столкновениях атомов аргона в основном состоянии с аргоновой мишенью в диапазоне энергий соударения от порога до 500 эВ (с.ц.м.), в условиях, соответствующих применимости адиабатического приближения.

Основные задачи диссертационного исследования:

1. Экспериментальное измерение абсолютных сечений и изучение механизмов возбуждения атомных состояний аргона в интервале главных квантовых чисел от 4 до 6 в указанной области энергий;
2. Исследование поведения сечений возбуждения в сериях в зависимости от главного квантового числа;
3. Измерение поляризации излучения атомов в зависимости от энергии налетающих частиц.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Проведены систематические измерения абсолютных сечений возбуждения атома аргона в интервале главных квантовых чисел от 4 до 6 в указанной области энергий столкновения;
2. Исследовано поведение сечений возбуждения в сериях в зависимости от главного квантового числа;
3. Изучена поляризация излучения атомов в зависимости от энергии налетающих частиц;
4. Для ряда уровней предложен вероятный механизм заселения.

Теоретическая и практическая значимость

Получены новые важные количественные характеристики эффективности различных каналов неупругого рассеяния атомов аргона, расчет которых в настоящее время недоступен для теории.

Результаты работы дают новые сведения для баз данных по характеристикам атомных процессов, в частности, о поведении сечений возбуждения тяжелых частиц в сериях в зависимости от главного квантового числа, о полных сечениях возбуждения уровней атомов аргона с главным квантовым числом $n \geq 4$ и их зависимости от энергии сталкивающихся частиц, о поляризации возбуждаемого излучения.

Эти данные необходимы для развития представлений о столкновениях многоэлектронных атомов, механизмах заселения возбужденных состояний, а также влиянии атомной массы и числа электронов на процессы изменения внутренней энергии налетающих частиц.

Методология и методы исследования

Экспериментальное исследование процессов возбуждения атомных состояний при взаимодействии пучка быстрых атомов аргона с газовой мишенью в условиях парных столкновений выполнено методами оптической спектроскопии.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Результаты измерений сечений возбуждения спектральных линий, составляющих серии переходов ($4 \leq n \leq 6$): $4s'[1/2]_1^0 - np'[1/2]_0$, $4s[3/2]_1^0 - np[1/2]_0$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_3$, $4s'[1/2]_0^0 - np'[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_2$, $4s'[1/2]_0^0 - np'[1/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_2$ – при энергии столкновения 450 эВ.

2. Результаты измерений функций возбуждения $4p[3/2]_2^-$, $4p'[3/2]_1^-$, $4p'[1/2]_1^-$ и $4p'[3/2]_2^-$ -уровней Ar I в диапазоне энергий столкновения от порога до 500 эВ (с. ц. м.).

3. Результаты измерений функций поляризации излучения $4s[3/2]_2^0 - 4p[3/2]_2$ - и $4s[3/2]_2^0 - 4p'[1/2]_1$ - переходов Ag I в диапазоне энергий столкновения от порога до 500 эВ (с.ц.м.).

4. Зависимость сечений возбуждения от главного квантового числа: $\sigma(n) \sim n^{-\alpha}$, где α характеризует сериальную зависимость и при энергии столкновения 450 эВ изменяется в интервале от 12 до 17. Положение о том, что с увеличением атомной массы и числа электронов сталкивающихся атомов величина α при малых n возрастает.

5. Механизм заселения $4p'[1/2]_1$ - и $4p[3/2]_2$ -уровней атома аргона.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях:

- Семнадцатой (XVII) Всероссийской научной конференция студентов-физиков и молодых ученых, 25 марта – 1 апреля 2011 г., г. Екатеринбург;

- Всероссийской (с международным участием) конференции по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП-2011), 21 – 27 июня 2011 г., г. Петрозаводск;

- Третьей международной конференции «Current Developments in Atomic, Molecular, Optical and Nano Physics» (CDAMOP 2011, 14th – 16th December 2011, Delhi University, Delhi, India);

- XIX Международной конференции “Gas Discharges and Their Applications” (GD 2012, 2nd – 9th September 2012, Beijing, China).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, достаточно полно отражающих ее материалы. В том числе 1 публикация в журнале из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Содержит 94 страницы, 43 рисунка, 11 таблиц. Список литературы содержит 76 наименований.

Соответствие Паспорту номенклатуры специальностей

Содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 01.04.04 – Физическая электроника Паспорта номенклатуры специальностей научных работников (физико-математические науки).

Основное содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, отмечены основные вопросы, которым в работе уделялось наибольшее внимание.

В **первой главе** рассмотрены основные результаты экспериментального и теоретического исследования процессов возбуждения и ионизации при столкновениях атомов аргона в основном состоянии в диапазоне энергий соударения от порога до нескольких кэВ. Основное внимание уделено механизмам процессов и возможным каналам реакций. При интерпретации неупругого взаимодействия использовалась квазимолекулярная модель атомных столкновений.

Из приведенных данных видно, что достаточно полно изучены каналы неупругого рассеяния, доступные для методов времяпролетной спектроскопии (ионизация, возбуждение резонансных и метастабильных состояний). Однако для состояний с $n \geq 4$ имеются лишь единичные экспериментальные данные, не позволяющие детализировать физическую картину взаимодействия частиц.

Во **второй главе** описана методика измерения сечений возбуждения атомных уровней при столкновениях тяжелых частиц,

проанализированы факторы, влияющие на достоверность получаемых сечений, а также сделана оценка систематической погрешности измерений. Кроме того, рассмотрена автоматизированная установка для исследования процессов возбуждения при атом-атомных столкновениях. Приводятся основные характеристики и параметры экспериментальной установки. Обсуждена схема измерительно-вычислительного комплекса, структура программного обеспечения.

Суть методики измерения сечений состоит в следующем.

Сечения возбуждения атомных уровней определяются по излучению, возбуждаемому при взаимодействии пучка быстрых частиц с газовой мишенью [8].

Непосредственно в эксперименте измерялись сечения возбуждения спектральных линий. Сечение возбуждения спектральной линии σ_{ij} определяется по числу фотонов, испущенных атомами при переходе с i -го на j -й уровень в области наблюдения.

Соотношение между сечением возбуждения спектральной линии и сечением возбуждения уровня, с которым эта линия связана, определяется уравнением баланса заселения и опустошения данного уровня.

Определение сечения возбуждения спектральной линии сводится к измерению абсолютной интенсивности линии, плотности потока налетающих частиц и плотности атомов мишени.

Экспериментальная установка позволяет методами оптической спектроскопии определять полные сечения возбуждения спектральных линий, поляризацию излучения сталкивающихся частиц, а также исследовать возбуждаемый спектр при взаимодействии пучка быстрых атомов и ионов с газовой мишенью в условиях парных столкновений. Спектральный диапазон установки – от 316 до 850 нм. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

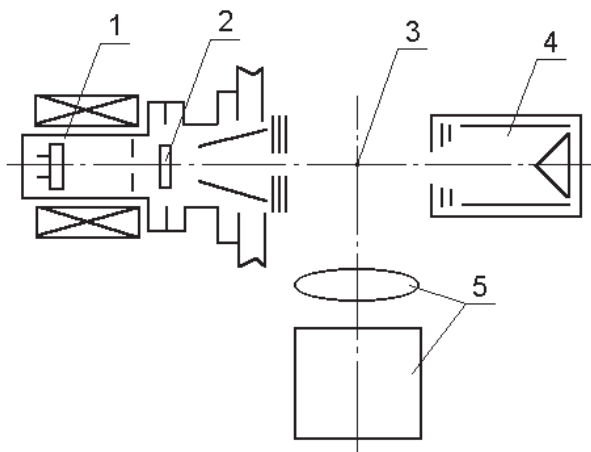


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки.

В состав установки входят: источник ионов и быстрых атомов 1, камера перезарядки ионов 2, газовая мишень 3, детектор быстрых частиц 4 и система регистрации оптического излучения 5, автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс на базе персонального компьютера и программно-управляемой системы КАМАК [9], а также вакуумная система.

Плотность потока быстрых атомов аргона в камере столкновений достигала 10^{14} част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Угловая расходимость пучка составляла $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ ср. Давление остаточного газа в камере столкновений не превышало $2 \cdot 10^{-5}$ Па. В обезгаженном источнике ионов при токе прямокального катода 40-42 А давление остаточного газа не превышало $3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Излучение возбужденных атомов из камеры столкновений с помощью кварцевого конденсора фокусировалось на входную щель монохроматора МДР-2 (обратная линейная дисперсия в первом порядке дифракции – 4 нм/мм (решетка 600 штр/мм), относительное отверстие – 1:2.5 и рабочий диапазон длин волн – 0.3-1.1 мкм, нестандартный редуктор). Оптическая ось конденсора была перпендикулярна пучку быстрых частиц. Анализ поляризации

излучения осуществлялся с помощью призмы Глана – Томсона. Для устранения влияния поляризующего действия монохроматора использовались четвертьволновые компенсаторы. Оптическое излучение регистрировалось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-106 в режиме счета фотонов. Скорость счета определялась с учетом мертвого времени регистрирующей системы. Максимальная спектральная чувствительность системы регистрации на длине волны 455 нм достигала $2.1 \cdot 10^{-2}$ имп/фот.

Для эксперимента был разработан комплект программ, который включает серверное программное обеспечение для работы с аппаратурой КАМАК, библиотеку методов для управления функциональными модулями экспериментальной установки, а также клиентское программное обеспечение для измерения сечений возбуждения спектральных линий, измерения спектров излучения атомных частиц, определения абсолютной спектральной чувствительности системы регистрации, градуировки дифракционного монохроматора по длинам волн и измерения коэффициентов вторичной электронной эмиссии с поверхности детектора под действием быстрых атомов.

Программное обеспечение комплекса написано на языке высокого уровня Java и используется для проведения эксперимента в режиме реального времени в среде операционной системы ОС Windows (а также совместимых с ней).

В работе показано, что сечения возбуждения спектральных линий с уровнями с $n = 4$ зависят от давления газа-мишени лишь при давлениях, больших $4 \cdot 10^{-1}$ Па. Поэтому в качестве рабочего был выбран диапазон давлений от $3 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-1}$ Па. В каждом конкретном случае давление газа-мишени определялось исходя из заданной погрешности измеряемого сечения при разумном времени накопления счетного сигнала.

При измерении поляризации излучения давление газа-мишени варьировалось от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3.5 \cdot 10^{-1}$ Па.

Систематическая погрешность измерения сечений возбуждения, включающая погрешность определения абсолютной чувствительности спектрометрической системы, погрешность измерения давления газ-мишени в камере столкновений и погрешность определения интенсивности атомного пучка, могла достигать 50 % (максимальная оценка погрешности; $P = 95$ %). Случайная погрешность в основном определялась временем накопления счетного сигнала и флуктуациями интенсивности атомного пучка. В диапазоне энергий быстрых частиц от 300 до 1000 эВ она не превышала 5-10 % (с вероятностью 95 %).

В третьей главе приведены результаты исследования процессов возбуждения Ag I при взаимодействии атомов аргона в основном состоянии в диапазоне энергий столкновения от порога до 500 эВ (с. ц. м.).

В диапазоне длин волн от 316 до 850 нм были измерены спектры излучения атомов Ag I при энергии столкновения 450 эВ. Всего было зарегистрировано 60 спектральных линий, принадлежащих атому Ag I главным образом обусловленных переходами с уровней с главным квантовым числом от 3 до 8. Все измерения выполнены в условиях однократных столкновений.

В таблицах 1 – 4 приведены относительные значения сечений возбуждения спектральных линий, образующих серии в зависимости от значения главного квантового числа.

Случайная погрешность измерения сечений в зависимости от главного квантового числа варьировалась от 5 % при $n = 4$ до 20 % при $n = 6$ (с вероятностью 95 %).

Таблица 1. Сечения возбуждения спектральных линий для $4s^2[1/2]_1^0 - np^2[1/2]_0$ -переходов Ag I при энергии столкновений 450 эВ.

n	λ , нм	σ_{ij} , отн. ед.
4	750.38	$1.3 \cdot 10^{-1}$
5	425.93	$8.9 \cdot 10^{-3}$
6	364.98	$1.1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Сечения возбуждения спектральных линий для $4s[3/2]_1^0 - np[1/2]_0^*$ - и $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_3^{**}$ -переходов Ag I при энергии столкновений 450 эВ.

n	λ^* , нм	λ^{**} , нм	$\Sigma\sigma_{ij}$, отн. ед.
4	751.46	811.53	1.8
5	419.83	420.06	$1.2 \cdot 10^{-2}$
6	360.65	356.76	$2.2 \cdot 10^{-3}$

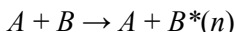
Таблица 3. Сечения возбуждения спектральных линий для $4s^2[1/2]_0^0 - np^2[3/2]_1^*$ - и $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_2^{**}$ -переходов Ag I при энергии столкновений 450 эВ.

n	λ^* , нм	λ^{**} , нм	$\Sigma\sigma_{ij}$, отн. ед.
4	794.81	801.47	$8.8 \cdot 10^{-1}$
5	419.10	419.07	$6.6 \cdot 10^{-3}$
6	374.37	356.42	$1.5 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Сечения возбуждения спектральных линий для $4s^2[1/2]_0^0 - np^2[1/2]_1^*$ -, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_1^{**}$ - и $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_2^{***}$ -переходов Ag I при энергии столкновений 450 эВ

n	λ^* , нм	λ^{**} , нм	λ^{***} , нм	$\Sigma\sigma_{ij}$, отн. ед.
4	772.42	772.37	763.51	1.0
5	418.18	416.41	415.85	$1.7 \cdot 10^{-2}$
6	356.32	355.60	355.43	$3.4 \cdot 10^{-3}$

Известно [10], что при взаимодействии атомных частиц типа



и фиксированной энергии столкновения сечения возбуждения уровней атомной частицы для каждой серии

$$\sigma(n) \sim n^{-3}$$

Однако, как показала обработка данных табл. 1-4 методом наименьших квадратов, сечения возбуждения не описываются этой зависимостью. Оказалось, что при фиксированной энергии соударения сечения возбуждения линий Ag I в сериях зависят от главного квантового числа следующим образом:

$$\sigma(n) \sim n^{-\alpha},$$

где α характеризует сериальную зависимость и изменяется в интервале от 12 до 17. В таблице 5 представлены значения α как параметра аппроксимирующей зависимость $\ln \sigma(n)$ прямых для интервала главных квантовых чисел от 4 до 6. Большой доверительный интервал свидетельствует лишь о том, что кривая $\ln \sigma(n)$ отличается от прямой линии.

Таблица 5. Зависимость сечений возбуждения спектральных линий в сериях Ag I от главного квантового числа при энергии столкновения 450 эВ

Переходы	α
$4s'[1/2]_1^0 - np'[1/2]_0$	12 ± 1
$4s'[1/2]_0^0 - np'[1/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_2$	14 ± 3
$4s'[1/2]_0^0 - np'[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_2$	16 ± 3
$4s[3/2]_1^0 - np[1/2]_0$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_3$	17 ± 3

На рисунке 2 показано поведение сечений возбуждения в сериях для $2^1S - n^1P$ -переходов He I (a), $3s[3/2]_1^0 - np[3/2]_1$ -переходов Ne I (b) и $4s'[1/2]_0^0 - np'[3/2]_1$ - и $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_2$ -переходов Ag I (c) при энергии столкновений 450 эВ. Из рисунка видно, как увеличивается наклон кривой $\ln \sigma(n)$ при переходе от He к Ag, и, следовательно, возрастает значение α .

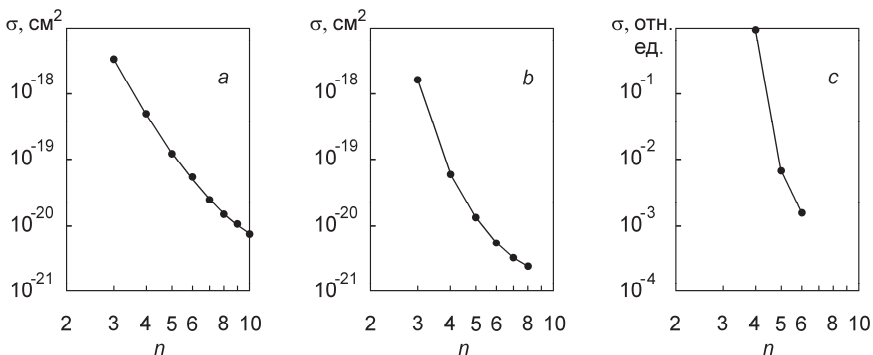


Рисунок 2 – Сечения возбуждения в сериях для 2^1S-n^1P -переходов He I (a), $3s[3/2]_1^0-np[3/2]_1$ -переходов He I (b) и $4s'[1/2]_0^0-np'[3/2]_1$ - и $4s[3/2]_2^0-np[5/2]_2$ -переходов Ar I (c) при энергии столкновений 450 эВ

Сечения возбуждения $4p[3/2]_2^-$, $4p'[3/2]_1^-$, $4p'[1/2]_1^-$ и $4p'[3/2]_2^-$ -уровней Ar I и функции поляризации для $4s[3/2]_2^0-4p[3/2]_2^-$ и $4s[3/2]_2^0-4p'[1/2]_1^-$ -переходов в диапазоне энергий столкновения от порога до 500 эВ (в системе центра масс) приведены на рисунках 3 – 6.

Систематическая погрешность (с учетом погрешности измерения спектральной чувствительности, погрешности определения коэффициента вторичной электронной эмиссии с поверхности детектора быстрых частиц и погрешности измерения давления газ-мишени) могла достигать $\pm 50\%$.

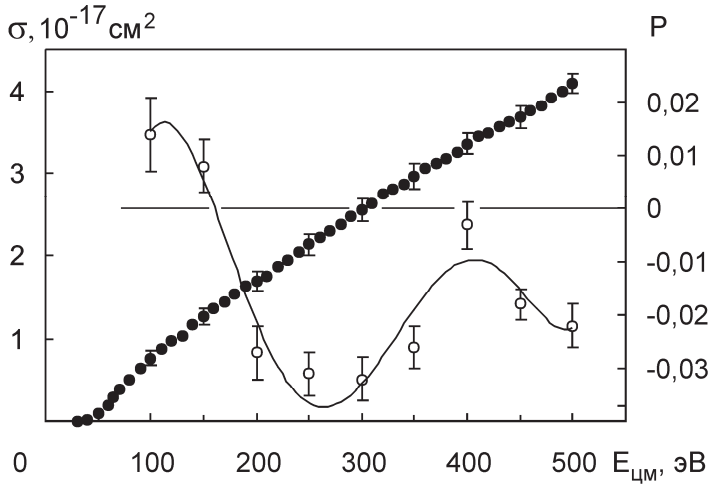


Рисунок 3 – Сечение возбуждения $4p[3/2]_2$ -уровня Ag I (●) и степень поляризации излучения для $4s[3/2]_2^0-4p[3/2]_2$ -перехода (○) в зависимости от энергии столкновения атомов аргона

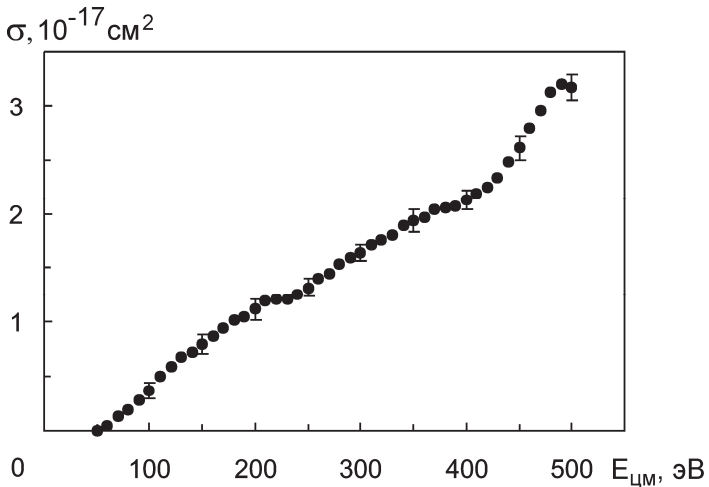


Рисунок 4 – Сечение возбуждения $4p'[3/2]_1$ -уровня Ag I в зависимости от энергии столкновения атомов аргона

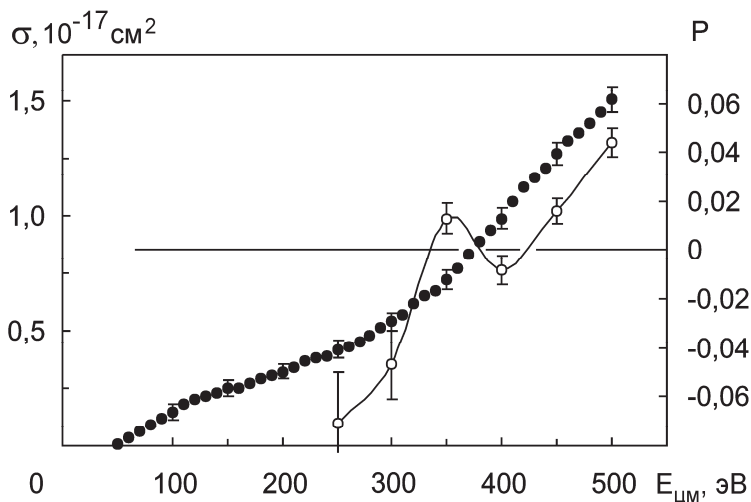


Рисунок 5 – Сечение возбуждения $4p'[1/2]_1$ -уровня Ag I (●) и степень поляризации излучения для $4s[3/2]_2^0 - 4p'[1/2]_1$ -перехода (○) в зависимости от энергии столкновения атомов аргона

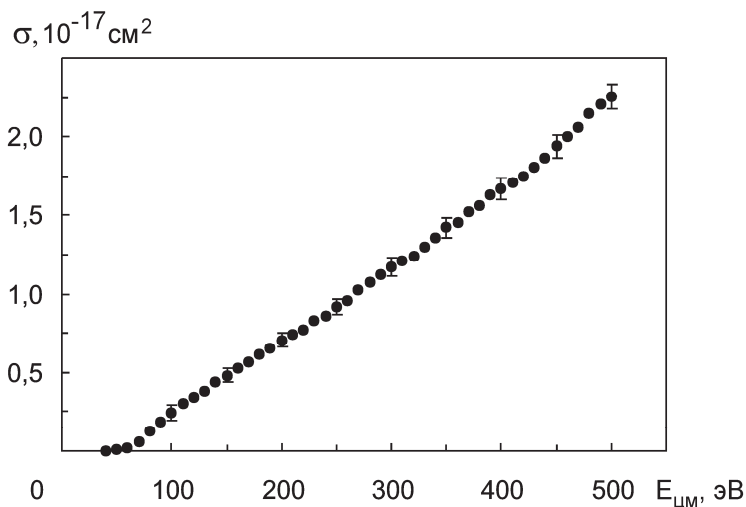


Рисунок 6 – Сечение возбуждения $4p'[3/2]_2$ -уровня Ag I в зависимости от энергии столкновения атомов аргона

Спектроскопические пороги представленных переходов составили ~ 50 эВ.

Из полученных данных видно, что степень поляризации излучения существенно зависит от энергии взаимодействия частиц, и при ее увеличении меняет знак. Изменение знака степени поляризации с изменением энергии взаимодействия свидетельствует об изменении механизма заселения уровней [11].

Поскольку полный момент J возбужденного состояния $4p'[1/2]_1$ равен 1, то положительный знак степени поляризации свидетельствует о преимущественном заселении магнитного подуровня σ_0 , соответствующего нулевой проекции момента на межъядерную ось квазимолекулы Ar_2 , тогда как отрицательный – о заселении магнитных подуровней σ_1 , соответствующих проекциям ± 1 . Поэтому, как следует из полученных данных, при энергии столкновения свыше 400 эВ основную роль в заселении указанного уровня играют $\Sigma_g - \Sigma'_g$ -переходы, тогда как при 300 эВ и ниже заселение уровня в большей степени обусловлено $\Sigma_g - \Pi_g$ -переходами в результате вращательной связи четных термов квазимолекулы Ar_2 .

На основании адиабатической корреляционной диаграммы молекулярных орбиталей для гомоядерной системы [12, 13] и результатов измерения поляризации излучения можно сделать вывод, что при энергиях столкновения до 300 эВ основной вклад в заселение $4p'[1/2]_1$ -уровня обеспечивают $4p\sigma - 4p\pi$ -переходы, обусловленные вращательным взаимодействием при малых межъядерных расстояниях, а при больших энергиях – $5f\sigma - 5d\sigma$ -переходы, обусловленные радиальным взаимодействием.

В случае $4p[3/2]_2$ -уровня при энергиях столкновения до 150 эВ основной вклад в заселение, вероятно, обеспечивают $\Sigma_g - \Sigma'_g$ -переходы, а при больших энергиях – $\Sigma_g - \Pi_g$ -переходы.

Отметим, что поскольку выходные Σ_g -термы квазимолекулы аргона – это дважды возбужденные термы, то можно предположить, что и второй из взаимодействующих атомов оказывается в возбужденном состоянии. Это согласуется с правилом Вигнера, которое утверждает, что полный спин системы при столкновении не

изменяется, а также с результатами, полученными, например, в работах [14, 15].

В **заклучении** кратко подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные выводы и обобщающие результаты.

Основные результаты работы

Основные выводы диссертационного исследования состоят в следующем:

В рамках работы методами оптической спектроскопии исследованы процессы возбуждения при столкновениях атомов аргона в диапазоне энергий налетающих частиц от 50 до 1000 эВ. В условиях парных столкновений определены полные сечения возбуждения атомных уровней Ar I, а также исследована поляризация излучения сталкивающихся частиц.

С помощью экспериментального комплекса исследован спектр возбуждения уровней Ar I при взаимодействии атомов аргона в основном состоянии (всего зарегистрировано 60 спектральных линий с уровнями с главным квантовым числом $4 \leq n \leq 8$). Определены сечения возбуждения уровней, составляющих серии переходов ($4 \leq n \leq 6$): $4s'[1/2]_1^0 - np'[1/2]_0$, $4s[3/2]_1^0 - np[1/2]_0$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_3$, $4s'[1/2]_0^0 - np'[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[5/2]_2$, $4s'[1/2]_0^0 - np'[1/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_1$, $4s[3/2]_2^0 - np[3/2]_2$ – при энергии столкновения 450 эВ. Также измерены функции возбуждения и спектроскопические пороги возбуждения $4p[3/2]_2^-$, $4p'[3/2]_1^-$, $4p'[1/2]_1^-$ и $4p'[3/2]_2^-$ уровней Ar I в диапазоне энергий столкновения от порога до 500 эВ (с. ц. м.), определены функции поляризации излучения $4s[3/2]_2^0 - 4p[3/2]_2^-$ и $4s[3/2]_2^0 - 4p'[1/2]_1^-$ переходов Ar I в той же области энергий. Эти данные позволили определить эффективность различных каналов возбуждения атомных состояний Ar I, а также исследовать механизмы заселения возбужденных уровней.

На основании представленных результатов, а также результатов по серийным закономерностям в системах He-He и Ne-Ne, опубликованных ранее, предложена зависимость сечений возбуждения от главного квантового числа:

$$\sigma(n) \sim n^{-\alpha},$$

где α характеризует серийную зависимость и при энергии столкновения 450 эВ изменяется в интервале от 12 до 17 (теоретическое описание процесса возбуждения дает $\alpha = 3$ [10]). Сделан следующий вывод: с увеличением атомной массы и числа электронов сталкивающихся атомов величина α при малых n возрастает.

Для уровней $4p'[1/2]_1$ и $4p[3/2]_2$ предложен механизм заселения, заключающийся во взаимодействии $\Sigma_g-\Sigma'_g$ -термов молекулярных орбиталей при энергии взаимодействия свыше 400 эВ и ниже 150 эВ соответственно, и во взаимодействии $\Sigma_g-\Pi_g$ -термов при энергии взаимодействия ниже 300 эВ и выше 200 эВ соответственно.

Публикации по теме диссертации

Основные положения диссертации представлены:

В журналах, рецензируемых ВАК МОиН РФ:

1. Kogochev A. Yu., Kurskov S. Yu., Sysun V. I. Excitation processes in Ar–Ar collisions // Proceedings of Petrozavodsk State University. – 2012. – № 8 (129). – Vol. 2. – P. 86–89. – ISSN 1998-1643.

В других изданиях:

2. Когочев А. Ю., Курсков С. Ю., Сысун В. И. Процессы возбуждения при столкновениях атомов аргона низких энергий // Физика низкотемпературной плазмы – 2011: Материалы Всероссийской (с международным участием) конференции (21–27 июня 2011 г.). – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. – Т. 1. – С. 269–273.
3. Когочев А. Ю., Кашуба А. С. Серийные закономерности в спектрах возбуждения атомов инертных газов низких энергий // Материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции

студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-17, Екатеринбург): материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2011. – С. 269–270.

4. Когочев А. Ю., Кашуба А. С., Филатов А. С. Изучение процессов возбуждения Ar I при столкновениях атомов аргона низких энергий // Материалы Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-17, Екатеринбург): материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2011. – С. 271–272.

5. Kogochev A. Yu., Kurskov S. Yu., Sysun V. I. Excitation of argon atoms in Ar–Ar collisions // Proceedings of the 3rd International Conference on «Current Developments in Atomic, Molecular, Optical and Nano Physics»: CDAMOP 2011, 14th – 16th December 2011, Delhi University, India. – Delhi, 2011.

6. Kogochev A. Yu., Kurskov S. Yu., Sysun V. I. On mechanisms of Ar I excitation in binary argon atoms collisions // Proceedings of the XIX International Conference on Gas Discharges and Their Applications, GD 2012 (2 – 7 September 2012, Beijing, China). – Beijing, 2012.

7. Волков А. А., Ильинов А. А., Когочев А. Ю. Распределенная система управления физическим экспериментом на базе Ethernet-устройств // Четырнадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-14, Уфа): Материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург – Уфа: Изд-во АСФ России, 2008. – С. 541–542.

8. Ильинов А. А., Когочев А. Ю. Программное обеспечение распределенной системы управления экспериментом на базе сетевых устройств // Материалы Пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-15, Кемерово – Томск): Материалы конференции, тезисы докладов. – Екатеринбург – Кемерово. – Томск: Изд-во АСФ России, 2009. – С. 657–658.

9. Курсков С. Ю., Ильинов А. А., Кипрушкин С. А., Когочев А. Ю. Обеспечение синхронизации в распределенной системе управления физическим экспериментом на базе Ethernet-устройств // Научный

сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность: Тр. Всерос. науч. конф., 21 – 26 сентября 2009 г., г. Новороссийск. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – С. 471–472. – ISBN 978-5-211-05697-8.

10. Когочев А. Ю., Курсков С. Ю. Исследовательская сеть для управления физическим экспериментом // Инновации в науке: Пути развития: материалы II Международной заочной научно-практической конференции. 5 марта 2012 г. / Гл. ред. А.Н. Ярутова. – Чебоксары, 2012. – С. 500–502. – ISBN 978-5-905389-14-6.

11. Когочев А. Ю., Курсков С. Ю. Распределенная информации-онно-измерительная и управляющая система на базе сетевых микропроцессорных устройств // Инфокоммуникационные технологии в науке, образовании и производстве: Пятая международная научно-техническая конференция (Инфоком-5): Кисловодск, Ставрополь, 2 – 6 мая 2012 г. Сборник научных трудов. Часть II. – Ставрополь: Северо-Кавказский гуманитарно-технический институт, 2012. – С. 37–40. – ISSN 2219–293X.

Список цитируемой литературы

1. Haugsjaa P. O., Amme R. C. Ionization and Metastable Excitation in Low-Energy Collisions of Ground State Argon Atoms // J. Chem. Phys. – 1970. – V. 52. – N. 9. – P. 4874-4877.
2. Gerber G., Morgenstern R., Niehaus A. Ionization processes in slow collisions of heavy particles II. Symmetrical systems of the rare - gases He, Ne, Ar, Kr // J. Phys. B. – 1973. – V. 6. – N.5. – P. 493-510.
3. Eriksen F. J., Fernandez S. M., Bray A. B., and Pollack E. Ionization in low-kev-energy Ar+Ar collisions // Phys. Rev. A. – 1975. – V. 11. – N. 4. – P. 1239-1244.
4. Brenot J. C. Collisions between rare-gas atoms at low keV energies. I. Symmetric systems / Brenot J. C., Dhuicq D., Gauyacq J. P., Pommier J., Sidis V., Barat M., Pollack E. // Phys. Rev. – 1975. – V. 11. – N. 4. – P 1245-1266.

5. Kempter V., Veith F., Zehnle L. Study of the optical emission in Ne+Ne and Ar+Ar collisions in the range 15 to 500 eV // J. Phys. B. – 1975. – V. 8. – N. 17. – P. 2835-2840.
6. Kempter V., Riecke G., Veith F., Zehnle L. Study of the optical emission in collisions between rare - gas atoms: spectra of the emitted radiation // J. Phys. B. – 1976. – V. 9. – N. 17. – P. 3081-3097.
7. Rothwell H. L., Jr., Amme R. C., and Van Zyl B. Ultraviolet radiation produced in low-energy Ar + Ar and Kr + Kr collisions // Phys. Rev. A. – 1979. – V. 19. – N.3. – P. 970–976
8. Wolterbeek Muller L., de Heer F. J. Electron capture into excited states by helium ions incident on noble gases // Physica. 1970. – V. 48. – P. 345-396.
9. Кашуба А. С., Курсков С. Ю. Распределенная система управления физическим экспериментом // Информационные технологии моделирования и управления. 2006. - № 9(34). – С. 1166–1171.
10. Бородин В. М. Связь между сечениями ионизации и возбуждения атомов при медленных столкновениях // Вопросы теории атомных столкновений. – Л.: Изд. ЛГУ. – 1986. – С.72-82.
11. Blum K. Density Matrix Theory and Applications. – New York and London: Plenum Press, 1981.
12. Fano U., Lichten W. Interpretation of Ar - Ar Collisions at 50 keV // Phys. Rev. Letters. – 1965. – V. 14. – N. 16. – P. 627-629.
13. Barat M., Lichten W. Extension of the Electron-Promotion Model Asymmetric Atomic Collisions // Phys. Rev. A. – 1972. – V. 6. – N. 1. – P. 211–229.
14. Martin P. J. Study of simultaneous emission of two photons in collisions between neon atoms using photon coincidence technique / Martin P. J., Riecke G., Hermann J., Zehnle L., Kempter V. // J. Phys. B. – 1987. – V. 11. – N. 11. – P. 1991–2001.
15. Moorman L. The simultaneous excitation of both collision partners to various substate combination in Ne–Ne and He–Ne collisions / Moorman L., van Hoegaerden V., van Eck J., Heideman H. G. M.// J. Phys. B. – 1989. – V. 20. – N. 23. – P. 6267–6282.

Подписано в печать 15.11.13. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Изд. № 380.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение Высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Отпечатано в типографии Издательства ПетрГУ
Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.