

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО  
ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени А.А.Жданова

На правах рукописи

ЦЕРКОВНЫЙ Сергей Иванович

УДК 539.186

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕКОМБИНИРУЮЩЕЙ  
ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ В СМЕСИ С ПАРАМИ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ  
МЕТАЛЛОВ

01.04.08 - физика и химия плазмы, 01.04.05 - оптика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Ленинград

1989

Работа выполнена на кафедре физики Ленинградского  
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени механичес-  
кого института имени Маршала Советского Союза Д.Ф.Устинова

Научные руководители : доктор технических наук, профессор  
Ю.П.Савельев  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
А.З.Девдариани

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
В.Н.Островский  
кандидат физико-математических наук  
В.Г.Певгов, должность и место работы  
указаны в решении Учёного Совета

Ведущая организация : Государственный оптический институт  
имени С.И.Вавилова

Защита диссертации состоится "В" октябрь 1989  
в час. на заседании специализированного совета  
К.063.57.10 по присуждению учёной степени кандидата наук  
в Ленинградском государственном университете им.А.А.Жданова  
по адресу : 199034, Ленинград, Университетская наб., 7/9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛГУ.

Автореферат разослан " " 1989 г.

Учёный секретарь специализированного совета,  
кандидат физико-математических наук

Тимофеев Н.А.

18 октября ~~1989~~ 1989

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время низкотемпературная плазма широко используется в качестве рабочей среды газоразрядных и плазменных лазеров и является объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. В последние годы большое внимание привлекает плазма щелочноземельных металлов подгруппы цинка (цинк  $Zn$ , кадмий  $Cd$  и ртуть  $Hg$ ) в связи с её возможным использованием в качестве эффективной рабочей среды рекомбинационных лазеров видимого, УФ и ближнего ИК-диапазонов длин волн. Интерес к плазме металлов II группы связан, прежде всего, с благоприятными для возникновения инверсий заселённостями уровняй однократных ионов переходных металлов  $Zn\text{II}$ ,  $Cd\text{II}$  и  $Hg\text{II}$ , а также с широким диапазоном длин волн переходов, на которых возможна генерация излучения.

Основным механизмом формирования инверсий заселённостей уровняй ионов в указанных средах является процесс перезарядки при тепловых столкновениях ионов гелия с атомами металла в основных состояниях, приводящий к образованию однократных ионов металла в различных возбуждённых состояниях [1]



где  $L_k$ ,  $J_k$  – квантовые числа орбитального и полного момента импульса иона металла в состоянии  $K$ ; индекс  $K$  нумерует конечные состояния иона металла, заселяемые в процессе перезарядки, и принимает значения от I для состояния с наименьшим дефектом энергии  $\Delta E_k$  в реакции (I) до  $N$  – максимального возможного числа конечных каналов. В связи с важной ролью реакций (I) в заселении верхних уровней рабочих радиационных переходов температурные зависимости констант скоростей процессов перезарядки необходимы для анализа условий эффективной работы рекомбинационных лазеров на соответствующих средах и определения оптимальных режимов.

К моменту постановки настоящей работы сечения перезарядки ионов гелия на атомах цинка, кадмия и ртути при тепловых энергиях ( $E = 0.025 - 0.1 \text{ эВ}$ ) были рассчитаны в [2,3] в рамках асимптотической теории процессов перезарядки с возбуждением ионов [4]. Однако результаты расчётов в [2,3] по суммарным величинам сечений расходятся с экспериментальными данными [5 - 12]. В связи с этим в данной работе рассматривается влияние на результаты расчётов учёта следующих особенностей реакций перезарядки (I) :  
1. наличия большого числа конечных каналов реакции например, для иона  $Zn^{II} - N = 7$ , а для иона  $Cd^{II} - N = 18$  ; 2. отличия поведения квазимолекулярных термов  $He(^4S_0) + M^+(n^2L_J)$  симметрии  $\bar{\Omega} = \pm \frac{1}{2}$  ( $\bar{\Omega}$  - проекция полного момента импульса квазимолекулы на межъядерную ось) в конечных каналах от поляризационных потенциалов взаимодействий, использованных в [2,3] для аппроксимации термов квазимолекул ; 3. значительной делокализации волновых функций валентных электронов иона металла в квазимолекуле  $He(^4S_0) + M^+(n^2L_J)$ , что приводит к перемешиванию при взаимодействии иона  $M^{+*}$  с атомом гелия волновых функций различных состояний иона металла  $|M^+(n^2L_J)\rangle$  в квазимолекулярной волновой функции  $\Psi_f$ . Полученные в данной работе температурные зависимости суммарных констант скоростей реакций перезарядки и констант скоростей других основных элементарных процессов (прежде всего, радиационных и столкновительных переходов между уровнями однократных ионов металла) соглашаются с экспериментом и позволяют рассмотреть кинетику формирования инверсий заселённостей разрешённых радиационных переходов между уровнями однократных ионов металлов в рекомбинирующей плазме.

Цель работы. Целью настоящей работы является теоретическое исследование механизмов реакции перезарядки ионов гелия на атомах щелочноземельных металлов подгруппы цинка  $Zn$ ,  $Cd$  и  $Hg$ , расчёт температурных зависимостей констант скоростей основных элементарных процессов в рекомбинирующей плазме гелия и паров соответствующих металлов и моделирование на ЭВМ оптических свойств рекомбинирующей

плазмы гелия при смешении с парами кадмия и ртути.

Научная новизна работы заключается в том, что :

1. Для произвольных конечных состояний иона металла  $M^+(n^2L_J)$  получены замкнутые выражения матричных элементов эффективного гамильтонiana квазимолекул  $He(^1S_0) + M^+(n^2L_J)$  в рамках метода псевдопотенциала и рассчитаны конечные термы квазимолекул в реакциях перезарядки ионов гелия на атомах цинка и ртути.

2. Предложена модель многоканальной перезарядки с возбуждением ионов в различные конечные состояния  $M^+(n^2L_J)$ , в рамках которой рассчитаны матричные элементы обменных взаимодействий  $W_{lf}$ , энергетические зависимости сечений  $\sigma_{fi}(E)$  и температурные зависимости констант скоростей  $K_{fi}(T)$  в реакциях перезарядки ионов гелия на атомах цинка, кадмия и ртути.

3. Рассчитаны оптические характеристики рекомбинирующих гелий-кадмievой и гелий-ртутной плазм с использованием вычисленных в данной работе температурных зависимостей констант скоростей основных элементарных процессов.

4. В модели невязкой, нетеплопроводной, двухтемпературной плазмы рассмотрен процесс формирования инверсной заселённости уровней атома гелия при сверхзвуковом расширении рекомбинирующей плазмы в сопле Лаваля.

Практическая ценность. В работе показано, что учёт особенностей конкретных реакций перезарядки в возбуждённые состояния ионов в рамках теории неадиабатических переходов между состояниями квазимолекул улучшает согласие теоретических и экспериментальных результатов по суммарным величинам сечений и констант скоростей (см. таблицу I). Развитые в работе методики расчёта энергетических зависимостей сечений и температурных зависимостей констант скоростей основных элементарных процессов использованы во второй главе работы при рассмотрении кинетики заселения уровней однократных ионов кадмия и ртути в рекомбинирующих гелий-кадмievой и гелий-ртутной плазмах. Полученные результаты могут быть использованы при экспериментальных исследованиях оптических свойств рекомбинирующих гелий-кадмievой и гелий-ртутной плазм.

На защиту выносятся :

1. Модель многоканальной перезарядки, в рамках которой получено согласие между экспериментальными и теоретическими величинами суммарных сечений и констант скоростей реакций (I).
2. Замкнутые выражения и рекуррентные формулы для расчёта термов квазимолекул  $He(^1S_0) + M^+(n^2L_J)$  в рамках метода псевдо-потенциала и вычисленные конечные термы в реакциях перезарядки ионов гелия на атомах цинка и ртути, которые позволяют уточнить парциальные сечения и константы скорости реакций.
3. Рекуррентные формулы для вычисления сечений возбуждения атомов и ионов при столкновениях с электронами плазмы, которые использованы при проведении массовых расчётов температурных зависимостей констант скоростей столкновительных переходов между возбуждёнными состояниями атома гелия и однократных ионов кадмия и ртути в рамках наиболее надёжных модификаций борновского приближения.
4. Результаты расчётов кинетики заселения уровней ионов  $Cd^{II}$  и  $Hg^{II}$  в гелий-калиевой и гелий-ртутной плазмах, которые показывают возможность создания лазеров на смешении исследованных сред и позволяют выделить наиболее перспективные оптические переходы  $4^2F_{5/2, 5/2} - 5^2D_{5/2, 3/2}$  ( $\lambda = 537.8, 533.7$  нм) иона  $Cd^{II}$  и  $7^2P_{3/2} - 7^2S_{1/2}$  ( $\lambda = 615$  нм) иона  $Hg^{II}$ .
5. Результаты расчётов, которые моделируют процесс сверхзвукового расширения рекомбинирующей плазмы гелия в сопле Лавали и показывают возможность формирования инверсий переходов  $3^1S - 2^1P$  ( $\lambda = 728.1$  нм) и  $3^3S - 2^3P$  ( $\lambda = 706.5$  нм) атома гелия в расширяющейся плазме.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XУ Международной конференции по явлениям в ионизованных газах /Минск, 1981/ ; УІ Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы /Ленинград, 1983/ ; Объединённой сессии научных Советов АН СССР по проблемам "Физика электронных и атомных столкновений" , "Физика низкотемпературной плазмы" /Ленинград, 1987/ ; IV Всесоюзном симпозиуме "Динамика элементарных

атомно-молекулярных процессов" /Черноголовка, 1987/ ;

Рабочем совещании "Активные среды плазменных и газоразрядных лазеров" /Гродно, 1987/ .

Публикации. По материалам диссертации опубликовано пять работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 9 таблиц и 152 ссылки на литературу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы выбор темы и актуальность диссертации, сформулированы решаемые задачи, приведены защищаемые положения.

В первой главе теоретически исследуются процессы нерезонансной перезарядки ионов гелия на атомах цинка, кадмия и ртути с возбуждением соответствующих однократных ионов металла. Характерной особенностью указанных реакций являются большие величины сечений и констант скоростей при тепловых энергиях, измеренные в эксперименте. В то же время, отмечается, что существовавшие к моменту постановки задачи модели  $\{2 - 4\}$  реакций (I) не объясняли большие величины суммарных сечений и констант скоростей, полученные в экспериментах  $\{5 - 12\}$ . В связи с этим, в настоящей работе предлагается модель многоканальной перезарядки, в рамках которой получено согласие результатов расчёта суммарных сечений и констант скоростей указанных реакций с экспериментальными данными.

В основе работы лежит предположение, что наиболее важным механизмом реакций (I) является механизм двухэлектронного перехода  $\{4\}$ . В рассматриваемых реакциях характерные межядерные расстояния, на которых возникают псевдолепрессечения начального терма квазимолекулы  $\text{He}^+(1^2S_{1/2}) + M(^1S_0)$  с термами квазимолекул  $\text{He}(^1S_0) + M^+(n^2L_J)$ , образующихся в конечных каналах реакции (I), сравнимы с соответствующими радиусами орбит валентного электрона иона металла  $M^+(n^2L_J)$ . В связи с этим, в первой главе проведено исследование квазимолекулярных термов симметрии  $\Omega = \pm \frac{1}{2}$  в реакциях перезаряд-

ки ионов гелия на атомах цинка и ртути. При вычислении матричных элементов обменного взаимодействия  $W_{ij}$  в окрестностях областей неадиабатичности учтено перемешивание одноэлектронных волновых функций иона  $|M^+(n^2L_J)\rangle$  взаимодействием иона  $M^+$  с атомом гелия в конечных каналах реакций (I)

$$\Psi_f = \sum_n a_n(R) \Phi_{f(n)}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{f(k)} = |He(^4S_0)\rangle \cdot |M^+(n_k^2 L_{J_k})\rangle$ . Амплитуды  $a_k(R)$  в разложении (2) определялись в результате диагонализации матрицы эффективного гамильтониана. При вычислении матричных элементов эффективного гамильтониана методом псевдопотенциала в работе использовались рекуррентные соотношения, позволившие обобщить формулы приведения матричных элементов к однократным интегралам из [13] на случай произвольных квантовых чисел конечных состояний квазимолекул. В расчётах термов число волновых функций базисного набора  $\Phi_{f(k)}$  определялось таким образом, чтобы расширение базиса не приводило к изменению термов квазимолекул  $He(^4S_0) + M^+(n^2L_J)$ , засеянных в реакции (I). В работе рассчитаны термы квазимолекул  $Li He^*$  - в рамках метода псевдопотенциала и показана надёжность использованного метода сравнением результатов расчётов данной работы с неэмпирическим расчётом аналогичных термов квазимолекул  $Li He^*$  в рамках многоконфигурационного приближения Хартри-Фока [14]. Отмечается хорошее согласие результатов расчётов данной работы с данными из [14]. Расчёт сечений и констант скоростей в реакции перезарядки ионов гелия на атомах кадмия проводился в рамках модели, в которой взаимодействие в конечных каналах предполагается близким к поляризационному взаимодействию, а квазимолекулярная волновая функция  $\Psi_f$  - совпадающей с  $\Phi_{f(n)}$ . Начальный терм  $U_i(R)$  во всех рассматриваемых реакциях при межъядерных расстояниях  $R \gtrsim 4$  а.е. можно аппроксимировать поляризационным взаимодействием вследствии "компактности" сталкивающихся партнёров (потенциалы ионизации атома металла  $I_M \approx 10$  эВ и иона гелия  $I_{He^*} = 54.4$  эВ).

При вычислении парциальных матричных элементов обменно-

го взаимодействия  $W_K$  [2] состояний квазимолекулы  
 $\Phi_i = |He^+(1s^2S_{1/2})\rangle|M(^4S_0)\rangle$  и  $\Phi_{f(K)} = |He(^4S_0)\rangle|M^+(n_K^2L_KJ_K)\rangle$

$$W_K = \langle \Phi_i | \hat{V} | \Phi_{f(K)} \rangle \quad (3)$$

интегрирование по координатам 3-х валентных электронов проводилось в области  $\Omega = S_{R/2} \otimes \mathbb{R}^3 \otimes \mathbb{R}^3$  ( $S_R(A)$  - шар радиуса  $R$  с центром в месте нахождения атома  $A$ ), в которой межэлектронное взаимодействие  $\hat{V}$  переходящего и возбуждающейся электронов атома  $M(^4S_0)$  можно рассматривать как малое возмущение.

В работе показано, что вследствие значительной делокализации электронов в конечных каналах реакции при вычислении парциальных матричных элементов  $W_K$  (3) целесообразно использовать разложение межэлектронного взаимодействия по мультипольям

$$\frac{1}{|r_1 - r_2|} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{4\pi}{(2\ell+1)} \cdot \frac{r_<^\ell}{r_>^{\ell+1}} \cdot \sum_{m=-\ell}^{\ell} Y_{\ell m}^*(\vec{\omega}_1) Y_{\ell m}(\vec{\omega}_2), \quad (4)$$

$r_< = \min(r_1, r_2)$ ,  $r_> = \max(r_1, r_2)$ . С учётом (4) матричные элементы  $W_K$  представляются в виде ряда

$$W_K = \sum_{\chi=0}^{\infty} W_{K,\chi}, \quad (5)$$

в котором основной вклад в результирующую величину матричного элемента  $W_K$  дают слагаемые с малыми  $\chi$  ( $\chi = 0, 1, 2$  и 3). Причём в отличие от [2 - 4] существенный вклад в  $W_K$  (в некоторых случаях основной вклад) дают слагаемые с  $\chi = 0$ .

При вычислении вероятности  $P_{f(K)l}$  перехода квазимолекулы из начального состояния  $l$  в конечное состояние  $f(K)$  в работе учтён многоканальный характер рассматриваемых реакций. В результате для вероятности  $P_{f(K)l}$  получается выражение

$$P_{f(K)l} = 2(1-p_K) \prod_{m=1}^K p_m \left[ 1 + \sum_{m=1}^{2(N-K)} \prod_{\ell=1}^m (-p_{K+\lfloor \frac{m-1}{2} \rfloor}) \right], \quad (6)$$

в котором учтено двухкратное прохождение квазимолекулой областей неадиабатичности при сближении и разлёте. Гасчёты вероятностей парных неадиабатических переходов  $p_K$  в работе

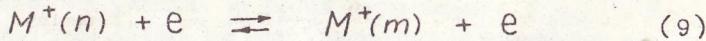
осуществлялись в рамках модели Ландау-Зинера с использованием вычисленных по формулам (3) - (5) матричных элементов обменного взаимодействия термов в окрестности соответствующей области неадиабатичности. Вычисление сечений  $\sigma_{f_i}(E)$  и констант скоростей  $K_{f_i}(T)$  проводилось численным интегрированием вероятности перехода  $P_{f_i(k)}(E)$  по формулам

$$\sigma_{f_i(k)}(E) = \tilde{\rho}_i \frac{\pi R_k^2}{E} \int_{\tilde{E}_k}^{E-U_{f_i(k)}} P_{f_i(k)i}(E, \varepsilon_k) d\varepsilon_k, \quad (7)$$

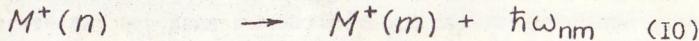
$$K_{f_i(k)i}(T) = \frac{\overline{U}}{(kT)^2} \int_0^{\infty} \sigma_{f_i(k)}(E) \cdot \exp(-\frac{E}{kT}) E dE, \quad (8)$$

$\overline{U} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \mu}}$ . В формуле (7) выбор нижнего предела интегрирования  $\tilde{E}_k$  осуществлялся с учётом эффекта орбитирования, который возникает вследствие притягательного характера начального терма квазимолекулы  $H\ddot{e}(1^2S_{1/2}) + M(^1S_0)$ . Рассмотрение, проведённое в первой главе, показывает, что последовательный учёт особенностей реакций (1) в рамках теории неадиабатических переходов при медленных атомных столкновениях улучшает согласие теоретических и экспериментальных величин суммарных сечений и констант скоростей перезарядки с возбуждением ионов  $Zn^+$ ,  $Cd^+$  и  $Hg^+$  (см. таблицу).

Во второй главе диссертационной работы рассматривается кинетика заселения уровней однократных ионов  $Hg^+$  и  $Cd^+$  в рекомбинирующих гелий-рутной и гелий-кадмийевой плазмах в приближении стационарного стока. Известно [1], что основным механизмом создания инверсной заселённости в соответствующих средах является процесс перезарядки (1), исследованный в первой главе работы. Наряду с этим процессом важную роль в формировании инверсной заселённости уровней ионов  $M^+(n)$  в условиях сильноионизованной рекомбинирующей плазмы играют процессы столкновительных



и радиационных



переходов. В связи с тем, что число заселяемых состояний иона велико, рассмотрен вопрос о возможности массового вычисления вероятностей спонтанных радиационных переходов  $A_{nm}$  и констант скоростей столкновительных переходов  $V_{nm}(T_e)$ . Предложены рекуррентные формулы, которые позволили осуществить массовые расчёты параметров  $A_{nm}$  и  $V_{nm}(T_e)$  в рамках борновского и модификации борн-кулоновского приближений на ЭВМ.

Рассчитанные параметры переходов  $A_{nm}$  и  $V_{nm}(T_e)$  использованы при численном исследовании кинетики заселения уровней ионов  $Hg^+$  и  $Cd^+$ . В кинетических расчётах в схеме уровней иона  $Hg^+$  учтено 15 нижних одноэлектронных состояний от основного состояния  $6^2S_{1/2}$  до  $8^2P_{3/2}$ , а в схеме уровней иона  $Cd^+$  учитывались 46 состояний от  $5^2S_{1/2}$  до  $10^2P_{3/2}$ . В расчётах учтены эффекты реабсорбции резонансного излучения по методу эффективного времени жизни для случая преимущественного допплеровского механизма уширения спектральных линий и плоской геометрии излучающего слоя плазмы толщиной 1 см. В рассматриваемой области параметров (концентрация электронов плазмы  $N_e = 10^{12} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; температура электронов плазмы  $T_e = 0.1 - 0.5 \text{ эВ}$  и концентрация атомов металла  $N_M = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) вычислены инверсии заселённостей  $\delta_{nm}$  и линейные коэффициенты усиления излучения  $\chi_{nm}$  на различных переходах ионов  $Hg^+$  и  $Cd^+$ . Показано, что в оптическом диапазоне длин волн наибольшие линейные коэффициенты усиления излучения реализуются на переходах  $7^2P_{3/2} - 7^2S_{1/2}$  ( $\lambda = 615 \text{ нм}$ ) иона  $Hg^+$  и  $4^2F_{7/2, 5/2} - 5^2D_{5/2, 3/2}$  ( $\lambda = 537.8, 533.7 \text{ нм}$ ) иона  $Cd^+$ . Максимальные коэффициенты усиления излучения указанных переходов в расчёте составляют  $\chi_{nm} = 0.07 \text{ см}^{-1}$  и  $\chi_{nm} = 0.05 \text{ см}^{-1}$  для переходов  $7^2P_{3/2} - 7^2S_{1/2}$  и  $4^2F_{7/2} - 5^2D_{5/2}$ , соответственно. Полученные в расчёте величины инверсий устойчивы по отношению к процессам пленения резонансного излучения, что позволяет рассчитывать на возрастание мощности генерации излучения при увеличении объёма рекомбинирующей плазмы. Надёжность результатов теоретического исследования оптических свойств рекомбинирующих гелий-кадмиевой и гелий-рутной плазм подтверждается в работе: 1. устойчивостью результатов расчётов относительно варьирования методик вычисления констант скоростей столкновительных переходов при  $N_e \leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; 2. сов-

падением ряда рассчитанных инверсных переходов с инверсными радиационными переходами, обнаруженными в эксперименте [15].

В связи с интересом проявляемым в последние годы к лазерам на струйных течениях в настоящей работе на основе численного решения совместной системы уравнений плазмодинамики и кинетики методом Гира [16] в модели невязкой, нетеплопроводной, двухтемпературной плазмы рассмотрено формирование инверсной заселенности уровней атома гелия в рекомбинирующей плазме гелия, истекающей со сверхзвуковой скоростью через сопло Лаваля в вакуум. Показано, что при использовании расширяющегося сопла Лаваля возможно формирование инверсий заселеностей переходов  $3^1S - 2^1P$  ( $\lambda = 706.5$  нм) и  $3^3S - 2^3P$  ( $\lambda = 728.1$  нм) атома гелия. Проведены расчёты на ЭВМ в случае истечения плазмы гелия в условиях, близких к экспериментальным [17]. Отмечается удовлетворительное согласие результатов расчёта с экспериментом.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе :

1. Предложена модель многоканальной перезарядки, в рамках которой получено согласие теоретических и экспериментальных суммарных сечений и констант скоростей перезарядки ионов гелия на атомах цинка, кадмия и ртути.
2. Получены формулы приведения матричных элементов эффективного гамильтониана к однократным интегралам для произвольных квантовых чисел конечных состояний иона металла и проведён расчёт конечных термов в реакциях перезарядки ионов гелия на атомах цинка и ртути, что позволило уточнить теоретические значения суммарных и парциальных сечений и констант скоростей.
3. Получены рекуррентные формулы для вычисления сечений возбуждения атомов и ионов электронным ударом в рамках борновского приближения и его различных модификаций, что позволило провести массовый расчёт температурных зависимостей констант скоростей столкновительных переходов между возбуждёнными состояниями атома гелия и однократных ионов кадмия и ртути.
4. Проведены расчёты кинетики заселения уровней ионов  $Cd^{II}$  и  $Hg^{II}$  в плазме гелия и паров соответствующих металлов, которые показывают возможность создания плазменных лазеров

на указанных рабочих средах и позволяют выделить наиболее перспективные оптические переходы  $4^2F_{7/2,5/2} - 5^2D_{5/2,3/2}$  иона  $Cd^{II}$  и  $7^2P_{3/2} - 7^2S_{1/2}$  иона  $Hg^{II}$ .

5. Проведены расчёты, которые моделируют процесс сверхзвукового расширения рекомбинирующей плазмы гелия в сопле Лаваля и показывают возможность формирования инверсий переходов  $3^4S - 2^4P$  и  $3^3S - 2^3P$  атома гелия в расширяющейся плазме.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Беляев А.К., Церковный С.И. Многоканальная перезарядка ионов гелия на атомах кадмия. - Опт. и спектр., 1987, т.63, вып.5, с. 968 - 972.

2. Беляев А.К., Закревский Н.В., Лукьяннов Г.А., Церковный С.И. Расчёты заселённостей уровней гелия в рекомбинирующей плазме. - Аэродинамика разреженных газов, Л.: изд.ЛГУ, 1983, вып.II, с. 231 - 243.

3. Закревский Н.В., Лукьяннов Г.А., Церковный С.И. Расчёты кинетических параметров при сверхзвуковом расширении плазмы гелия в сопле Лаваля. - ЖТФ, 1982, т.52, вып.7, с. 1318 - 1326.

4. Zackrevsky N.V., Luk'yanov G.A., Tserkovnyi S.I. Kinetics of the helium level population in plasma flow. - In.: XV Int. Conf. of Phenomena in Ionized Gases. Abstr. of Papers. Minsk, 1981, p. 909-910.

5. Закревский Н.В., Церковный С.И. Кинетика заселения уровней иона кадмия в смеси с гелием. - В кн.: VI Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы /Ленинград, 1983/. Тезисы докладов, Л., 1983, с. 447 - 449.

1. Держиев В.И., Жидков А.Г., Карелин А.В., Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.Ф., Яковленко С.И. Письма в ЖТФ, 1988, т.14, вып. I, с.18-21.
2. Карбованец М.И., Островский В.Н., Ивакин И.А. Вестник ЛГУ, 1986, Деп.ВИНТИ № 3515-В86, с.1-27.
3. Шалашилин Д.В. Автограферат диссертации на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. - М.: МЭИ, 1986. - 26 с.
4. Думан Е.Л., Тищенко Н.П., Шматов И.П. ДАН СССР, 1983, т.271, с.853-856.
5. Collins G.J. J.Appl.Phys., 1973, v.44, p.4633-4652.
6. Kano H., Shay T., Collins G.J. Appl.Phys.Lett., 1975, v.27, p.610-612.
7. Картазаев В.А., Пиотровский Ю.А., Толмачёв Ю.А. Вестник ЛГУ, 1977, № 22, с.42-49.
8. Бочкова О.П., Толмачёв Ю.А. Опт. и спектр., 1979, т.46, вып.6, с.1149-1156.
9. Пиотровский Ю.А., Толмачёв Ю.А., Касьянова С.В. Опт. и спектр., 1982, т.52, вып.4, с.754-756.
10. Богданова И.П., Марусин В.Д., Яхонтова В.Е. Опт. и спектр., 1974, т.37, вып.4, с.643-648.
11. Baltayan P., Pebay-Peyroula J.C., Sadeghi N. J.Phys.B, 1985, v.18, N 17, p.3615-3628.
12. Baltayan P., Pebay-Peyroula J.C., Sadeghi N. J.Phys.B, 1986, v.19, N 17, p.2695-2702.
13. Загребин А.Л., Павловская Н.А. Хим.физика, 1988, т.7, № 4, с.435-445.
14. Jungnickel M., Staemmler V., J.Phys.B, 1988, v.21, N 3, p.463-484.
15. Вайннер В.В., Зинченко С.П., Иванов И.Г., Сэм М.Ф. Квантовая электроника, 1980, т.7, № 5, с.1019-1027.
16. Gear C.W. Comm. ACM, 1971, v.14, p.176-179.
17. Жинников Г.М., Лукьянов Г.А., Назаров В.В., Павлова Н.О. ЖТФ, 1978, т.48, вып.5, с.949-955.

ТАБЛИЦА

Суммарные сечения и константы скорости  $K_z$  ( $\cdot 10^{10}$  см $^3$ /с)  
реакций перезарядки ионов гелия на атомах кальция, цинка  
и ртути, к/с

реакция	Теория		Эксперимент	
	поляризационная модель	метод зондового измерения	$\sigma_z$ , к $\Omega^3/0$	$K_z$ , см $^3$ /с
$\bar{O}_z + \bar{R}_2$	$K_z, \text{ам}^3/\text{с}$	$\bar{\sigma}_z, \text{к}^2 - K_z, \text{см}^3/\text{с}$		
$\bar{O}_z + \bar{K}_z$	$K_z, \text{ам}^3/\text{с}$	$\bar{\sigma}_z, \text{к}^2 - K_z, \text{см}^3/\text{с}$		
$\text{He}^+ + \text{Zn}$	15.5	1.92	21.3	2.62
$\text{He}^+ + \text{Cd}$	12.1	1.48		
$\text{He}^+ + \text{Rg}$	158.7	17.0	99.4	12.1
	0.621	0.077	0.0025	0.00035
				$0.09-0.13$
			1.6	$7/9/10/11/12/13/14/15/16/17$

✓ В таблице приведены экспериментальные сечения и константы скорости при тепловой

энергии и температуре. Данные расчета соответствуют  $E = 0.025$  эВ,  $KT = 0.1$  эВ.

■■■ В работах [9, 10] измерено только сечение и константа скорости возбуждения состояния  $74P_{3/2}$  ядра ртути. Соответствующие теоретические значения приведены в таблице.