

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

На правах рукописи
УДК 539.186

БЕЛНЕВ АНДРЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОНСТАНТ СКОРОСТЕЙ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕДАЧИ
ВОЗБУЖДЕНИЙ В ГЕЛИЙ-НЕОНОВОМ ЛАЗЕРЕ

01.04.05 – оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Л е н и н г р а д
1983

Работа выполнена на кафедре оптики Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственного университета им. А.А.Жданова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
А.Э.Девдариани

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Е.Е.Нikitin
доктор физико-математических наук
В.Н.Островский

Ведущая организация: Латвийский государственный университет
им. П.Стучки.

Защита состоится " " 1983 г. в _____
на заседании специализированного совета К.063.57.10 по при-
суждению ученой степени кандидата физико-математических наук
в Ленинградском государственном университете им. А.А.Жданова.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
им. М.Горького ЛГУ им. А.А.Жданова.

Автреферат разослан " " 1983 г.

Ученый секретарь специализированного
совета

Э.И.Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. При исследовании процессов парных столкновений атомных частиц в условиях низкотемпературной плазмы или ионизованного газа непосредственно измеряемой величиной является зависящая от температуры константа скорости соответствующей реакции. Для максвелловского распределения реагирующих частиц константа скорости $K_{fi}(T)$ перехода из начального состояния i в конечное состояние f ¹⁾ связана с сечением $\sigma_{fi}(E)$ уравнением

$$K_{fi}(T) = \frac{\bar{v}}{(\kappa T)^2} \int_0^{\infty} \sigma_{fi}(E) E e^{-\frac{E}{kT}} dE, \quad (1)$$

где $\bar{v} = \sqrt{\frac{8\pi T^3}{\pi\mu}}$, μ — приведенная масса сталкивающихся частиц. В свою очередь сечение в квазиклассическом приближении определяется интегрированием вероятности P_i перехода $i \rightarrow f$ по параметрам удара

$$\sigma_{fi}(E) = 2\pi p_i \int P_{fi} \delta dP, \quad (2)$$

p_i — статистическая вероятность нахождения системы в начальном состоянии i .

При теоретическом исследовании вероятность перехода в общем виде может быть определена из решения связанной системы дифференциальных уравнений. В то же время в физике атомных столкновений большое распространение получили модели неадиабатических переходов, в которых рассматривается взаимодействие только двух квазимолекулярных состояний. В рамках этих моделей при определенной схематизации зависимостей термов и взаимодействий от межатомного расстояния R удается получить аналитическую связь вероятности перехода с параметрами моделей. Примерами таких моделей являются модели Ландау-Зинера, Демкова, Никитина (конкретные параметры моделей определены ниже).

1) Под i , f подразумевается совокупность квантовых чисел, с помощью которых задаются начальное и конечное состояния сталкивающихся атомов.

В связи с уравнениями (1), (2) интерес представляет решение прямой задачи — определение температурной зависимости константы скорости в рамках определенной модели. Такая задача возникает, в частности, при анализе работы и оптимизации различных физико-технических устройств, в которых рабочей средой является плазма или ионизованный газ, так как именно константа скорости входит в соответствующие уравнения баланса. При исследовании элементарных процессов в условиях низкотемпературной плазмы интерес представляет также решение обратной задачи — определение энергетической зависимости сечения по экспериментально измеренной температурной зависимости константы скорости.

К моменту постановки настоящей работы константа скорости была вычислена для ряда простых модельных зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ [1], что касается $K(T)$ для моделей неадиабатических переходов, то необходимость двукратного интегрирования и появление дополнительного параметра, связанного с температурой, не позволили отчетливо проследить зависимость $K(T)$ от параметров модели. Поэтому актуальной является задача изучения зависимости константы скорости для моделей неадиабатических переходов от параметров моделей и температуры.

В настоящее время интенсивно исследуется возбуждение атомов при столкновениях в поле лазерного излучения с частотой, отличной от резонансной частоты возбуждения. При этом теоретическое обсуждение ограничивается вычислением вероятности перехода в рамках той или иной модели неадиабатического взаимодействия. Экспериментально указанный процесс исследуется в условиях газовой ячейки, поэтому здесь снова возникает задача связи константы скорости с параметрами модели.

В физике лазеров важное место занимают элементарные процессы при столкновениях атомов (передача возбуждения, нерезонансная перезарядка и т. п.). Значительное количество экспериментальных данных по таким процессам получены в условиях плазмы или газовой ячейки, т. е. экспериментально измерены температурные зависимости констант скоростей. Решение обратной задачи, как правило, основывается на использовании упрощенной модели сечения, например, модели "ступеньки" для эндотермической реакции. По полученному сечению устанавлива-

ется механизм реакции, т.е. выбирается модель, в рамках которой может быть описан процесс столкновения, и определяются соответствующие модельные параметры. Такой подход может привести к неправильному заключению о механизме реакции, поэтому задача определения механизма реакции и энергетической зависимости сечения по экспериментально измеренным температурным зависимостям констант скоростей также является актуальной. Особый интерес представляет решение такой задачи для процессов передачи возбуждения от метастабильных атомов гелия к атомам неона, поскольку эти процессы представляют пример реакций, константы скорости для которых экспериментально изучены наиболее полно, кроме того, эти процессы лежат в основе работы гелий-неонового газового лазера.

Многочисленные исследования в настоящее время посвящены перспективным плазменным лазерам. При анализе инверсий в таких лазерах, в частности, на гелий-неоновой смеси, приходится иметь дело с константами скоростей, поэтому и для этой задачи использование констант скоростей передачи возбуждения от метастабильных атомов гелия к атомам неона в широком температурном интервале также актуально.

Цель работы. Целью настоящей работы является:

- 1/ теоретическое исследование температурных зависимостей констант скоростей неадиабатических переходов для моделей Ландау-Зинера, Демкова, Никитина и применение полученных результатов к исследованию процессов возбуждения атомов при столкновениях в поле лазерного излучения;
- 2/ установление механизмов реакции и определение энергетических зависимостей сечений передачи возбуждения от метастабильных атомов гелия к атомам неона;
- 3/ исследование рекомбинирующей гелий-неоновой плазмы на основе температурных зависимостей констант скоростей передачи возбуждения от атомов гелия к атомам неона.

Научная новизна. 1. Впервые получена формула для константы скорости в случае взаимодействия как отталкивателей, так и притягивающих термов. Полученное выражение связывает константу скорости однократным интегрированием с вероятностью неадиабатического перехода, когда вероятность перехода зависит от радиальной скорости на критическом расстоянии между части-

цами.

2. На основе полученной формулы вычислены и исследованы температурные зависимости констант скоростей для моделей Ландау-Зинера, Демкова, Никитина.

3. Предложена методика определения механизма реакции и параметров неадиабатического взаимодействия непосредственно из экспериментальных данных по температурной зависимости констант скоростей с последующим определением энергетической зависимости сечений.

4. В качестве применения предложенной методики из экспериментальных данных по температурной зависимости константы скорости определены механизмы реакций, параметры взаимодействия и энергетические зависимости сечений для процессов передачи возбуждения от атомов гелия в состоянии $He(2^3,1^1S)$ к атомам неона.

5. Впервые рассчитаны заселенности уровней гелия и неона в рекомбинирующей плазме и показана возможность возникновения устойчивой инверсии заселенностей.

Практическая значимость. Полученные результаты можно использовать как для расчетов температурных зависимостей констант скоростей, что необходимо при исследовании работы и оптимизации устройств, использующих плазму или газ, так и для исследования элементарных процессов, экспериментальные данные для которых получены в условиях низкотемпературной плазмы или газовой ячейки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Получена формула для константы скорости неадиабатического перехода в случае, когда вероятность перехода зависит от радиальной скорости на критическом межатомном расстоянии. Формула связывает константу скорости однократным интегрированием с вероятностью неадиабатического перехода и может быть представлена в виде суммы двух членов, один из которых связан с пороговым значением сечения, а второй — с уединенной вероятностью.

2. При помощи асимптотик и численных расчетов исследованы температурные зависимости констант скоростей для моделей Ландау-Зинера, Демкова, Никитина в широких диапазонах изменения параметров.

3. Установлено, что зависимость интенсивности свечения атомной линии от интенсивности лазерного излучения в смеси $Rb + Xe$ может быть описана в рамках моделей неадиабатических переходов вплоть до величин интенсивности, которым соответствуют максимум излучения.

4. Предложена методика определения механизма реакции, параметров взаимодействия и энергетической зависимости сечения из данных по температурной зависимости константы скорости.

5. Установлено, что реакция передачи возбуждения от атомов $He(2^1S)$ к атомам неона связана с ландау-зинеровским пересечением, причем терм конечного состояния отвечает притяжению атомов в области неадиабатичности.

6. Установлено, что пороговый характер реакции тушения состояния $He(2^3S)$ при столкновениях с атомами Ne связан с ландау-зинеровским пересечением терма исходного состояния.

7. Рассчитаны инверсии заселеностей в рекомбинирующей гелий-неоновой плазме на переходах $Ne(4s) - Ne(3p)$.

Апробация полученных результатов. Основные результаты докладывались на УП Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкновений (Петрозаводск, 1978), У Всесоюзной школе по физике электронных и атомных столкновений (Бакуриани, 1980), Ш Межвузовской конференции "Физические процессы в газоразрядной плазме" (Ленинград, 1982).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 97 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 116 библиографических ссылок на литературу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе содержится обзор литературы. Отмечается, что в физике атомных столкновений широко используются модели неадиабатических переходов, в частности, модель с квазипере-

секающимися линейными термами (модель Ландау-Зинера [2]), модель с параллельными диабатическими термами (модель Демкова[3]) и экспоненциальная модель (модель Никитина [4]). В указанных моделях переходы локализованы в окрестности критического межатомного расстояния R_0 . В модели Ландау-Зинера вероятность перехода равна

$$P_f(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}) = 2 \exp(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}) [1 - \exp(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*})], \quad (3)$$

где $\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*} = \sqrt{\frac{2\pi W^2}{\Delta F}}$ — характерный параметр модели, W — матричный элемент взаимодействия, ΔF — разность сил между двумя пересекающимися термами, ε — энергия радиального движения.

В модели Демкова вероятность перехода равна

$$P_f(\beta_n) = \frac{1}{2 \sin^2 \beta_n}, \quad (4)$$

$$\beta_n = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon^*} / \sqrt{\varepsilon^*}, \quad \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon^*} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \Delta E}{2 \kappa}, \quad (5)$$

где ΔE — дефект энергии, $\pi \kappa$ — параметр, характеризующий ширину области неадиабатичности. В модели Никитина

$$P_f(\beta_n) = 2 \exp(\beta_n \cos \theta) \frac{\sin(\beta_n - \beta_n \cos \theta) \sin(\beta_n + \beta_n \cos \theta)}{\sin^2(2\beta_n)}, \quad (6)$$

параметр θ характеризует расщепление адиабатических термов при $R = R_0$ и варьируется в интервале $0 \leq \theta \leq \pi$, β_n определяется формулой (5). Для моделей Ландау-Зинера и Демкова рассчитаны сечения [5, 6], а в рамках модели Ландау-Зинера для отталкивательных термов получена константа скорости [7]. Из обзора литературы следует, что к моменту постановки настоящей работы интерес представляла задача вычисления и исследования константы скорости для моделей неадиабатических переходов Ландау-Зинера, Демкова, Никитина в случае произвольного характера термов и сечения в модели Никитина.

Результаты исследования К(Т) могут быть применены к процессам возбуждения атомов при столкновениях в поле лазерного излучения. Обзор литературы показывает, что имеется ряд экспериментальных данных по указанным процессам в условиях газовой ячейки, в то время как теоретический анализ ограничивается использованием вероятности переходов в рамках моделей неадиабатического взаимодействия. Для проверки теоретических положений, которые используются для описания этого процесса, экспериментальные данные необходимо сравнить с константами скорости.

Значительное количество экспериментальных данных по

процессам столкновения атомных частиц получены в условиях газовой ячейки, т.е. экспериментально измерены константы скорости. Для решения обратной задачи, как правило, используются упрощенные модели сечений, например, модель "ступеньки". По полученному сечению устанавливается механизм реакции. Такой подход может привести к неправильному заключению о механизме реакции. Примером реакций, константа скорости для которых экспериментально изучена наиболее полно, являются процессы передачи возбуждения от метастабильных атомов гелия к атомам неона. К моменту постановки настоящей работы были известны экспериментально измеренные константы скорости этих процессов и термы исходных состояний $\text{He}(2^3S) + \text{Ne}$. Из обзора литературы следует, что представляла интерес задача определения механизмов указанных реакций и энергетических зависимостей сечений.

Указанные процессы передачи возбуждения ответственны за создание инверсии заселенностей не только в газовом, но также и в плазменном лазере, использующем рекомбинирующую плазму смеси гелия с неоном в качестве активной среды. Обзор литературы показывает, что к моменту постановки данной работы представляла интерес задача исследования рекомбинирующей гелий-неоновой плазмы и определения характеристик этой плазмы в зависимости от внешних параметров.

Во второй главе получены и исследованы константы скорости для моделей неадиабатических переходов Ландау-Зинера, Демкова, Никитина и эти результаты применены для исследования процессов возбуждения атомов при столкновениях в поле лазерного излучения.

Для моделей неадиабатических переходов Ландау-Зинера, Демкова, Никитина вероятность перехода P_{fi} зависит только от энергии радиального движения при $R = R_0$. При этом сечение (2) процесса равно

$$\sigma_{fi}(E) = \frac{\pi R_0^2 p_i}{E} \int_{-\infty}^{E-U_0} P_{fi}\left(\frac{E}{\sqrt{E-U}}\right) dE, \quad (7)$$

E — полная энергия сталкивающихся атомов, U_0 — потенциальная энергия $U(R_0)$. Для константы скорости в эндотермическом случае с дефектом энергии ΔE получается следующая формула

$$K_{f_i}(T) = p_i \bar{v} \pi R_0^2 \Phi(T) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (8)$$

$$\Phi(T) = \frac{\Delta E}{kT} \frac{\overline{\sigma}_{f_i}(\Delta E)}{p_i \pi R_0^2} + \langle P \rangle \exp\left(\frac{\Delta E - \overline{\epsilon}_0}{kT}\right). \quad (9)$$

Здесь $\overline{\sigma}_{f_i}(\Delta E)$ — пороговая величина сечения, определяемая по формуле (7) при $E = \Delta E$. $\langle P \rangle$ — усредненная вероятность, вычисляемая по формуле

$$\langle P \rangle = \frac{2}{T^*} \int_{-\infty}^{T^*} p_{f_i}(x) \exp\left(-\frac{1}{T^* x^2}\right) \frac{dx}{x^3}, \quad (10)$$

где $T^* = \frac{kT}{\overline{\epsilon}^*}$, $\overline{\epsilon}^* = \sqrt{\Delta E - \overline{\epsilon}_0}$.

Таким образом, константа скорости выражается через вероятность перехода однократным интегрированием, что связано с наличием единственной существенной координаты реакции [7].

В данной работе рассмотрены случаи, когда вероятности перехода описываются формулами Ландау-Зинера, Демкова, Никитина. Для этих моделей сечение равно

$$\overline{\sigma}_{f_i}(E) = 4\pi R_0^2 p_i \left(1 - \frac{\overline{\epsilon}_0}{E}\right) B(\gamma, \theta), \quad (11)$$

$$\text{где } B(\gamma, \theta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} p_{f_i}(yx, \theta) \frac{dx}{x^3}, \quad \theta = \sqrt{E - \overline{\epsilon}_0}.$$

Функция $\Phi(T)$ в выражении (8) для константы скорости записется в виде

$$\Phi(T^*, \overline{\epsilon}^*, \theta) = \frac{4}{T^* \overline{\epsilon}^*} B\left(\frac{T^*}{\overline{\epsilon}^*}, \theta\right) + \langle P \rangle e^{-\frac{1}{T^* \overline{\epsilon}^*}}. \quad (12)$$

Если переход происходит в области, где оба терма соответствуют отталкиванию атомов, то $\overline{\epsilon}^* = \infty$ и $B\left(\frac{T^*}{\overline{\epsilon}^*}, \theta\right) = 0$.

В настоящей работе для трех указанных моделей подробно исследованы функции $B(\gamma, \theta)$, $\langle P \rangle$, $\Phi(T)$, получены асимптотические выражения, приводятся графики численных расчетов этих функций в широких диапазонах изменения параметров.

Полученные выше результаты применены к процессам возбуждения атомов при столкновениях в поле лазерного излучения с частотой ω , отличающейся от резонансной частоты возбуждения ω_0 : $A(1) + B + \hbar\omega \rightarrow A(2) + B$. При изменении интенсивности лазерного излучения I_L меняется параметр задачи $\overline{\epsilon} \sim I_L$.

Имеется ряд экспериментов, в которых измеряется относительная интенсивность свечения атомной линии $S(I_L)$ от интенсивности лазерного излучения, обнаружено отклонение от линейной зависимости при интенсивности $I_L \approx 10^8 \text{ Вт/см}^2$. Эта величина существенно меньше величины, полученной из оценок экспериментальных данных на основе формулы для вероятности перехода в рамках модели Ландау-Зинера. Указанный процесс

изучался в условиях газовой ячейки, поэтому результаты необходимо сравнить с константами скорости. Выражение для константы скорости можно записать в зависимости от параметров $t = \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{kT}} \sim \frac{1}{\sqrt{T_0}} \cdot M = \frac{\Delta E - U_0}{kT} \sim \frac{1}{\sqrt{T_0}} + \frac{1}{\omega}$, где потенциалы отсчитаны от U_0 . Интенсивность $S(T_0)$ достаточно сравнивать с функцией $\Phi(t)$. В настоящей работе рассчитаны зависимости $\Phi(t)$ при разных значениях параметров M в модели Ландау-Зинера и проводится сравнение рассчитанных значений $\Phi(t)$ с экспериментально измеренными $S(T_0)$ на примере смеси $He^+ + Ne$ [8]. Показано, что отклонение от линейной зависимости $S(T_0)$ достаточно хорошо описывается в рамках модели Ландау-Зинера. Расхождение с экспериментом наблюдается в области больших интенсивностей лазерного излучения. Обсуждаются причины расхождений.

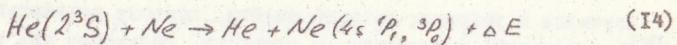
В третьей главе диссертационной работы исследованы процессы передачи возбуждения при тепловых столкновениях $He^+ + Ne$. Механизмы реакций, параметры взаимодействия и энергетические зависимости сечений определены из анализа экспериментальных данных по температурным зависимостям констант скоростей в рамках моделей неадиабатических переходов.

Температурная зависимость константы скорости реакции $He(2^1S) + Ne \rightarrow He + Ne(5^1P) - 0.048 \text{ эВ}$ (13)

известна в интервале $T = 77 \pm 1300 \text{ К}$ [9, 10]. При $T < 900 \text{ К}$ разрушение связано с передачей возбуждения в состояние $Ne(3^1P)$, поэтому можно предположить, что реакция обусловлена неадиабатическим взаимодействием только двух термов в окрестности R_0 .

Из анализа экспериментальных данных по константе скорости в рамках моделей неадиабатических переходов сделан вывод о притягательном характере терма конечного состояния при $R \approx R_0$ и необходимости учета эффекта закручивания. Влияние этого эффекта на константу скорости рассмотрено в работе Девдариани [11]. Из сравнения экспериментальных данных с рассчитанными в случае модельных потенциалов конечного состояния $U_f \sim R^{-6}$ и $U_f \sim R^{-4}$, определены параметры взаимодействия и энергетическая зависимость сечения. Результаты последующих работ [12] подтвердили вывод о притягательном характере этого терма.

С точки зрения детального исследования процессов в гелий-неоновом лазере также представляют интерес реакции



В параграфе 3.2 из анализа экспериментальных данных по К(Т) тушения состояния $He(2^3S)$ [9, 13, 14] в двухуровневом приближении сделан вывод, что реакция (14) обусловлена ландау-зинеровским пересечением на отталкиватальном участке терма исходного состояния, при анализе использовались результаты исследования К(Т) для моделей Ландау-Зинера, Демкова, Никитина. В этом же параграфе критически анализируется традиционный метод исследования экспериментальных данных по константе скорости с помощью усредненного сечения и конкретно показывается, что этот метод приводит к неправильным выводам о механизме реакций.

Анализ данных по дифференциальному рассеянию [15] показал, что барьер связан с пересечением терма исходного состояния с промежуточным термом $He + Ne(3d, 4p)$, поэтому заселение состояний $Ne(4s^1P_1, ^3P_0)$ происходит через промежуточный терм, пересекающий термы начального и конечного состояний.

В настоящей работе получены выражения для сечения и константы скорости в случае трех термов, при этом учитывается снижение потенциального барьера при адиабатическом движении и многократное прохождение областей неадиабатичности при колебательном движении в потенциальных ямах. С учетом многократного прохождения областей неадиабатичности вероятность перехода запишется в виде

$$P_{f_i} = \frac{\rho \tau}{\rho + \tau - \rho \tau}. \quad (15)$$

Вероятность распада ρ на термы конечного состояния после прохождения барьера при двукратном прохождении области неадиабатичности определяется ландау-зинеровскими пересечениями промежуточного терма с термом конечного состояния. Коэффициент прохождения потенциального барьера τ определяется адиабатическим движением и ландау-зинеровским переходом. Из сравнения рассчитанных К(Т) с экспериментальными данными по тушению $He(2^3S) + Ne$ определены параметры взаимодействия и энергетические зависимости сечений. В широком температурном интервале рассчитаны отдельно константы скорости передачи возбуждения на уровни $Ne(4s^1P_1, ^3P_0)$ и $Ne(3d, 4p)$ при столкновениях $He(2^3S) + Ne$.

В четвертой главе диссертационной работы рассчитаны заселенности в рекомбинирующей гелий-неоновой плазме, в которой передачи возбуждения играют определяющую роль.

Показано, что в диапазонах электронных температур $T_e = 0.05 \pm 0.50$ эВ и концентраций свободных электронов $N_e = 10^{13} \pm 10^{17}$ см⁻³ при концентрации свободных частиц $N < 10^{18}$ см⁻³ возможно применение приближения стационарного стока. В рассматриваемых условиях необходимо учитывать столкновения электронов с атомами, которые приводят к переходам между возбужденными уровнями и ионизации, трехчастичную рекомбинацию, спонтанные радиационные переходы и процессы передачи возбуждения между атомами гелия и неона.

Система уравнений баланса в приближении стационарного стока имеет вид

$$\sum_{m=2}^{n_1} K_{nm} N_m + D_n = 0, \quad n=2, \dots, n_1, \quad (16)$$

где K_{nm} — релаксационная матрица, недиагональные элементы которой характеризуют частоту соответствующих переходов $m \rightarrow n$, а диагональные элементы K_{nn} определяют разрушение атомов в состоянии n . D_n определяют приход в состояние n из всех состояний, не включенных в дискретный спектр ($n = 2, \dots, n_1$). n_1 — число уровней в дискретном спектре.

Для определения заселеностей N_m/g_m уровней составлена программа решения системы уравнений (16), учитывающая 25 уровней гелия и 50 уровней неона в дискретном спектре. В результате расчета установлено, что в атомах неона заселенности уровней, лежащих ниже уровней $3d$, определяются за счет передачи возбуждения $\text{He}(2^3S) + \text{Ne} \rightarrow \text{He} + \text{Ne}(4s, 3d)$, а заселенности уровней, лежащих выше уровней $3d$, определяются рекомбинационным потоком из континуума. Благодаря передачи возбуждения от $\text{He}(2^3S)$, возникают инверсные заселенности ряда уровней неона между состояниями $4s$ и $3p$. Установлено, что плазма чистого неона не представляется перспективной для создания плазменного лазера. Из расчетов следует, что оптимальным отношением концентраций атомов гелия N_{He} и атомов неона N_{Ne} является величина $N_{\text{He}}/N_{\text{Ne}} \leq 10^{-3}$, отношением концентрации свободных электронов к N_{He} — величина $N_e/N_{\text{He}} = 10^{-1} \pm 10^{-3}$.

Показано, что инверсия уровней $4s-3p$ обусловлена очисткой нижнего рабочего уровня за счет столкновений с электронами, поэтому инверсная заселенность не исчезает в оптически толстой плазме.

Результаты данной работы применимы к двум случаям: когда рекомбинирует плазма смеси гелия и неона, и когда атомы неона в основном состоянии смешиваются с рекомбинирующей плазмой гелия. Длины волн переходов, на которых наблюдаются инверсные заселенности, заключены в диапазоне $\lambda = 8993 + 15238 \text{ \AA}$. Таким образом, на рекомбинирующей плазме смеси гелия с неоном возможно получение устойчивой генерации.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Получены и исследованы выражения для константы скорости неадиабатических процессов для одной области перехода. Эти выражения связывают константу скорости однократным интегрированием с вероятностью перехода в случае, когда вероятность зависит только от радиальной скорости на критическом расстоянии.

2. Для моделей Ландау-Зинера, Демкова, Никитина в широких областях изменения параметров рассчитаны сечения и константы скорости. Получены асимптотические выражения.

3. В рамках модели Ландау-Зинера исследованы процессы возбуждения атомов при столкновениях в поле лазерного излучения. На примере смеси $Rb+Xe$ показано, что экспериментально измеренные зависимости свечения атомной линии от интенсивности лазерного излучения согласуются с рассчитанными до интенсивности $I \approx 10^{10} \text{ вт/см}^2$, в частности, экспериментально установленные отклонения от линейности достаточно хорошо объясняются в рамках указанной модели.

4. Предложена методика определения механизма реакции и энергетической зависимости сечения непосредственно из данных по температурной зависимости константы скорости с использованием асимптотик и численных расчетов.

5. Теоретически исследован процесс передачи возбуждения при столкновениях $He(2^1S)+Ne$. Из анализа экспери-

ментальных данных по температурной зависимости константы скорости установлено, что терм конечного состояния $\text{He} + \text{Ne}(5s\frac{1}{2})$ отвечает притяжению, что согласуется с последующими расчетами и экспериментами. Показано, что передача возбуждения связана с ландау-зинеровским пересечением термов начального и конечного состояний, при этом необходимо учитывать эффект закручивания. Определены параметры взаимодействия и восстановлена энергетическая зависимость сечения.

6. Теоретически исследован процесс тушения состояния $\text{He}(2^3S)$ при столкновениях с атомами неона. Из анализа экспериментальных данных по температурной зависимости константы скорости установлено, что реакция связана с ландау-зинеровским пересечением терма исходного состояния на отталкивателем участке. Теоретически определены сечения и константы скорости передачи возбуждения отдельно на уровнях $\text{Ne}(4s\frac{1}{2}, ^3P_1)$ и $\text{Ne}(3d, 4p)$ при столкновениях $\text{He}(2^3S) + \text{Ne}$.

7. Теоретически исследована рекомбинирующая плазма смеси гелия и неона в приближении стационарного стока. При заданных параметрах плазмы рассчитаны значения заселенностей состояний атомов гелия и неона. Установлены устойчивые и значительные величины инверсий заселенностей уровней неона $4s - 3p$. Оптимальные отношения концентраций атомов неона к атомам гелия $N_{\text{Ne}} / N_{\text{He}} \leq 10^{-3}$. Показано, что инверсии возникают как в случае, когда рекомбинирует плазма смеси $\text{He} + \text{Ne}$, так и в случае, когда рекомбинирующая плазма чистого гелия смешивается с атомами неона в основном состоянии.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Беляев А.К., Девдариани А.З. Температурная зависимость константы скорости неадиабатических процессов. Модель Ландау-Зинера. Опг. и спектр., 1978, т. 45, с. 448-453.

2. Беляев А.К., Девдариани А.З. Константа скорости неадиабатических процессов. В кн.: Тезисы докладов УП Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкновений. Часть 2, Петрозаводск, 1978, с. 31.

3. Беляев А.К., Девдариани А.З., Костенко В.А., Толмачев Ю. Сечение возбуждения $\text{Ne}(5s\frac{1}{2})$ при тепловых столкновениях

- $\text{He}(2^3S) + \text{Ne}$. Опт. и спектр, 1980, т.49, с.633-637.
4. Беляев А.К., Девдариани А.З. Определение параметров квазимолекулярных термов и энергетической зависимости сечений из данных по температурной зависимости константы скорости неадиабатических реакций. В кн.: Физика электронных и атомных столкновений (материалы симпозиумов У Всесоюзной школы по физике электронных и атомных столкновений. Бакуриани, 1980), Тбилиси, 1982, с.107-112.
5. Беляев А.К., Девдариани А.З. Сечение возбуждения $\text{Ne}(4s\frac{3}{2}, \frac{1}{2})$ при тепловых столкновениях $\text{He}(2^3S) + \text{Ne}$. Опт. и спектр, 1982, т.53, с.610-613.
6. Беляев А.К., Девдариани А.З., Загребин А.Л. Температурная зависимость константы скорости неадиабатических переходов. Модели Демкова и Никитина. Опт. и спектр, 1982, т.53, с.807-811.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. М., Наука, 1975.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М., Наука, 1974.
3. Демков Ю.Н. ЖЭТФ, 1963, т.45, с.195.
4. Никитин Е.Е. Опт. и спектр, 1962, т.13, с.761.
5. Moiseiwitsch B.L. "Meteors", Spec. Suppl. to J. Atm. Terr. Phys., 1955, v. 2, p.23.
6. Olson R.E. Phys. Rev. A, 1972, v. 6, p. 1822.
7. Никитин Е.Е., Быховский В.К. Опт. и спектр, 1965, т.17, с.815.
8. Бонч-Бруевич А.М., Максимов Ю.Н., Пржебельский С.Г., Хромов В.В. ЖЭТФ, 1979, т.76, с.1990.
9. Jones C.R., Niles F.E., Robertson W.W. J. Appl. Phys., 1969, v. 40, p. 3967.
10. Костенко В.А., Толмачев Ю.А. Опт. и спектр, 1979, т.47, с.1050.
11. Девдариани А.З. Опт. и спектр, 1979, т.47, с.106.
12. Haberland H., Konz W., Oesterlin P. J. Phys. B, 1982, v. 15, p. 2969.
13. Lindinger W., Schmeltekopf A. L., Fenssenfeld F. C. J. Chem. Phys., 1972, v. 61, p. 2890.
14. Житников Р.А., Картошин А.В., Клементьев Г.В., Мельников В.Д. ЖЭТФ, 1981, т.80, с.992.
15. Haberland H., Oesterlin P. Z. Phys. A, 1982, v. 304, p. 11.