

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ С ВОЗБУЖДЕННЫМИ АТОМАМИ НЕОНА

А. С. Хайкин

Для решения различных физических задач, связанных с высокотемпературной неравновесной плазмой (газовый разряд низкого давления, оптические квантовые генераторы (ОКГ), ионосфера, астрофизические задачи и т.д.), необходимы эффективные сечения возбуждения и девозбуждения атомов при столкновениях с электронами. Имевшиеся экспериментальные данные относятся исключительно к переходам из основного состояния; для переходов между возбужденными состояниями ввиду многих трудностей эксперимента данные полностью отсутствуют. Отсутствие эксперимента не позволяет также судить о применимости различных теоретических методов расчета [1] к столкновениям с возбужденными атомами. Газовые ОКГ позволяют получить необходимую информацию о таких столкновениях.

Рассмотрим конкретный случай гелий-неонового ОКГ. Возникновение генерации, например на переходе $Ne\ 5s'[\frac{1}{2}]_1^o \rightarrow 3p'[\frac{3}{2}]_2$, $\lambda = 6328\ \text{Å}$, приводит к изменениям ΔN_2 , ΔN_1 заселенностей N_2 , N_1 уровней 2 и 1 (рис. 1). При периодическом прерывании генерации (модуляция) заселенности N_2 , N_1 модулируются с противоположными фазами, так как знаки ΔN_2 и ΔN_1 противоположны. Вместе с N_2 , N_1 модулируются и интенсивности спонтанных линий, начинающихся с уровней 2 и 1. Если какой-либо уровень 3, не участвующий в генерации, связан с уровнями 1 или 2 столкновениями или спонтанным переходом, то заселенность N_3 должна модулироваться, причем фаза ее

110

должна совпадать с фазой того уровня (1 или 2), с которым связан уровень 3.

Такая модуляция заселенности уровней, не участвующих в генерации, была обнаружена экспериментально [2,4]. В [2] обнаружена модуляция заселенностей уровней $Ne\ 4s'$, $4s$, близких к верхнему уровню $4s'[\frac{1}{2}]_1^0$ перехода $\lambda = 1,15$ мк. Эта модуляция обусловлена атом-атомными столкновениями. Сечения одного из таких процессов ($Ne(4s'[\frac{1}{2}]_1^0) \xrightleftharpoons{Ne, He} Ne(4s'[\frac{1}{2}]_1^0)$) измерены в [3]. В [4], помимо атом-атомных столкновений с $Ne\ 5s'[\frac{1}{2}]_1^0$, обнаружены электронные столкновения типа:



при генерации на переходах $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ и $3,39$ мк (рис. I). Здесь приводятся результаты исследования процесса (I) для $n = 4, 5$.

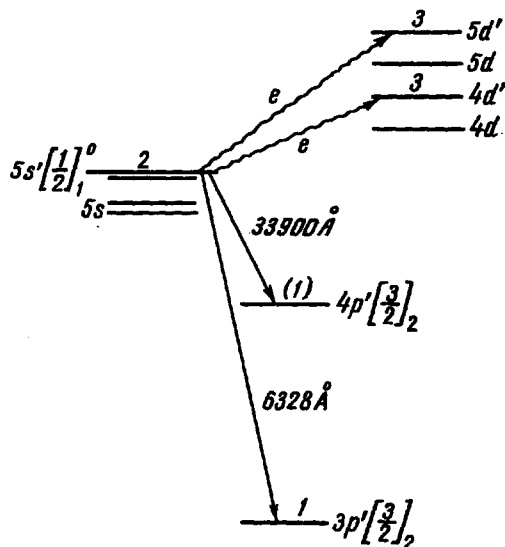


Рис. I

Рассмотрение баланса заселенностей на уровнях 3 (nd') в присутствии генерации и без нее позволяет получить следующую формулу для отношения измеряемых сигналов модуляции $y = \Delta I_2 / \Delta I_3$

$$y = M_{23} \left(\frac{W_3^R}{S_{23}^e} + \frac{S_3^e}{S_{23}^e} \right); \quad M_{23} = \frac{A_2}{A_3} \frac{H_2 \nu_2}{H_3 \nu_3}. \quad (2)$$

Здесь $A_2, A_3, H_2, H_3, \nu_2, \nu_3$ - соответственно вероятности переходов, коэффициенты преобразования регистрирующей системы и частоты для линий, на которых ведется измерение, S_{23}^e - вероятность перехода $2 \rightarrow 3$ при электронных столкновениях, S_3^e - суммарная вероятность переходов с уровня 3, вызванных электронными столкновениями, W_3^R - суммарная вероятность всех переходов с уровня 3, не связанных с электронными столкновениями. Подставляя сюда выражение для вероятности перехода при столкновениях $S_{ik}^e = n_e \langle \sigma_{ik}^e \nu_e \rangle$ и обозначая

$$a = M_{23} \frac{W_3^R}{\langle \sigma_{23}^e \nu_e \rangle}, \quad (3a)$$

$$b = M_{23} \frac{\langle \sigma_3^e \nu_e \rangle}{\langle \sigma_{23}^e \nu_e \rangle}, \quad (3б)$$

получаем линейную зависимость измеряемой величины

$$y = ax + b \quad (4)$$

от $x = 1/n_e$. Эта простая зависимость получена при следующих предположениях: 1) скорость возбуждения Q_3 считается не зависящей от генерации; 2) атом-атомные столкновения типа $2 \rightleftharpoons 3$ исключены из рассмотрения (оправдано при $\Delta E_{23} \gg kT_a$); 3) вклад электронных столкновений типа $1 \rightleftharpoons 3$ считается пренебрежимо малым; 4) все ступенчатые процессы типа $2 \rightleftharpoons j \rightleftharpoons 3$ исключены из рассмотрения. Критерием годности этой модели должна служить экспериментальная зависимость $y = f(1/n_e)$.

Из (3) и (4) получаем:

$$\frac{S_3^e}{W_3^R} = \frac{b}{a} n_e; \quad (5a)$$

$$\langle \sigma_{23}^e \nu_e \rangle = \frac{A_2}{a} \frac{W_3^R}{A_3} \frac{H_2 \nu_2}{H_3 \nu_3}. \quad (5б)$$

Таким образом, описанный метод позволяет по формулам (3)-(5) определять непосредственно важные параметры столкновений электронов с возбужденными атомами.

Процессы (I) исследованы в гелий-неоновом ОКГ, генерирующем линию $\lambda = 6328 \text{ \AA}$. Разрядная трубка имеет внутренний диаметр 3 мм; давление смеси ~ 1 тор при соотношении $Ne:He \approx 1:7$. Ток разряда изменялся от 10 до 75 ма (соответственно n_e изменялось от $4,3 \cdot 10^{11}$

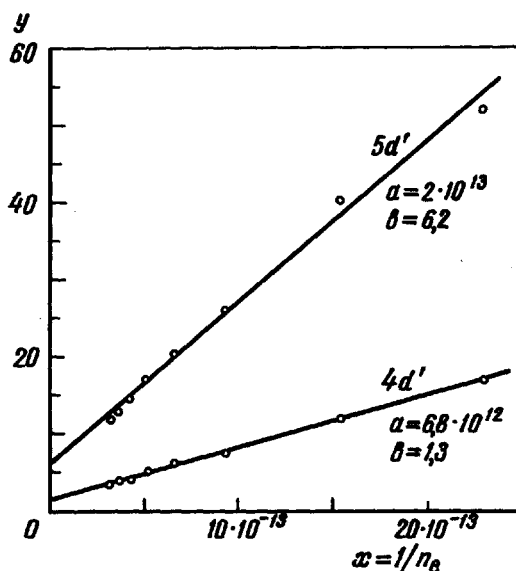


Рис. 2

до $3,25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Электронная температура $T_e \approx 7$ эв. На рис. 2 показаны экспериментальные графики для уровней Ne $4d'$ и $5d'$, для которых принятая модель оправдывается. В таблице приведены результаты

Уровни Ne	Расстояние от $5d' [\frac{1}{2}]_2$		S_2^e / W_3^R		$\langle \sigma_{23}^e v_e \rangle$, $\text{см}^3/\text{сек}$
	см^{-1}	эв	$i = 10 \text{ ма}$	$i = 75 \text{ ма}$	
$4d'$	1150	0,14	0,084	0,64	$\gg 6 \cdot 10^{-7}$
$5d'$	3630	0,45	0,13	1,0	$\gg 1,5 \cdot 10^{-7}$

$T_e \approx 7$ эв; при $i = 75 \text{ ма}$, $j \approx 2,5 \text{ а/см}^2$, $n_e = 3,25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

расчетов по формулам (5). В формуле (5б) $A_2 = A_{6328 \text{ \AA}}^0 = 8 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ [5], а величина $W_3^R/A_3 \gg 1$. Поэтому в последнем столбце даны нижние

границы величин $\langle 6_{23}^e \nu_e \rangle$. Получение точных значений $\langle 6_{23}^e \nu_e \rangle$ возможно, если величины A_2 и W_3^2/A_3 известны (например, из теоретических расчетов). Из таблицы видно, что в условиях разряда в гелий-неоновом ОКГ электронное девозбуждение d' -уровней Ne может играть такую же роль, как и радиационные переходы. Аналогичные выводы можно сделать и о роли электронных столкновений в девозбуждении уровня $Ne 5s'[\frac{1}{2}]_1^o$.

Описанные эксперименты показывают, что даже относительно простая модель с линейной зависимостью $y = f(I/n_e)$ оправдывается в некоторых случаях. Эти случаи могут быть использованы для непосредственного определения эффективных сечений отдельных электронных процессов. Усложнение модели может расширить область применимости метода. Автор благодарен С.Г.Раутиану и Г.Г.Петрашу за ценные дискуссии.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступило в редакцию

6 декабря 1965 г.

Литература

- [1] И.И.Собельман. Введение в теорию атомных спектров, гл. XI. М., Физматгиз, 1963.
- [2] J. H. Parks, A. Szöke, A. Javan. Bull. Amer. Phys. Soc., 9, 490, 1964.
- [3] J. H. Parks, A. Javan. Phys. Rev., 139, 1351A, 1965.
- [4] В.М.Каслин, Г.Г.Петраш, А.С.Хайкин. Препринт ФИАН, 1965.
- [5] В.П.Чеботяев. Диссертация. Ин-т физики полупроводников СО АН СССР, Новосибирск, 1965.