УДК 621.373

В. М. БАКУМЕНКО, канд. физ.-мат. наук, *В. И. ЧЕБОТАРЕВ*, канд. физ.-мат. наук, *Л. Д. ФЕСЕНКО*, канд. физ.-мат. наук

ВЛИЯНИЕ $V-V$-ПРОЦЕССОВ НА ПОРОГОВОЕ УСЛОВИЕ И НАСЫЩЕНИЕ ЛАЗЕРОВ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

При анализе работы лазеров с оптической накачкой (ЛОН), работающих в непрерывном режиме, обычно принимаются во внимание вращательная и колебательная релаксации. В этом случае входящая в выражение для выходной мощности разность населенностей n_{23} вращательных уровней, между которыми имеет место лазерный переход, в соответствии с моделью кинетических уравнений имеет вид [1]

$$n_{23} = \frac{Nf_1W}{2\Gamma_R}\,\frac{1-(f_3g_2/g_3-f_2)\,\Gamma_R/\Gamma}{1+W\,(\Gamma+f_1\Gamma_R)/\Gamma_R\Gamma}. \qquad (1)$$

Здесь N — общее число молекул газа; f_1 — относительная населенность вращательного уровня, с которого производится накачка; f_2, g_2, f_3, g_3 — относительные населенности и статистические веса вращательных уровней, между которыми имеет место лазерный переход; W — скорость накачки; Γ, Γ_R — скорости колебательной и вращательной (R) релаксаций.

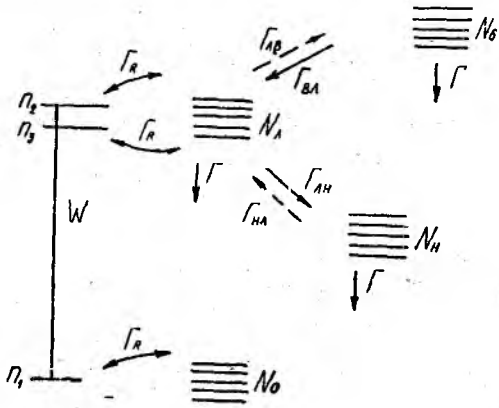
Из выражения (1) определяются условие положительного усиления $(f_3g_2/g_3-f_2)\,\Gamma_R/\Gamma<1$ **(2)** и насыщающая скорость накачки $W_S=\Gamma_R\Gamma/(\Gamma+f_1\Gamma_R)$ **(3)**, т. е. скорость, при которой разность населенностей снижается вдвое по отношению к этому же значению в отсутствие насыщения.

Выражения (2), (3), полученные для простейшей модели, дают, как показано далее, завышенное значение порогового условия и заниженное значение насыщающей скорости накачки. Это обстоятельство при поиске активных сред ЛОН может привести к тому, что некоторые молекулы, пригодные для ЛОН, при их оценке по формулам (2), (3) окажутся забракованными.

Рассмотрим влияние колебательно-колебательной ($V-V$) релаксации на условие положительного усиления, а также насыщение ЛОН и получение в результате уточненных выражений, аналогичных (2), (3). Для этого используем модель лазера, изображенную на рисунке. Рабочий газ в основном колебательном состоянии имеет населенность N_0. В данном состоянии находится нижний лазерный уровень с населенностью n_1. Верхний и промежуточный уровни с населенностями n_2, n_3 расположены в возбужденном колебательном состоянии $\nu_л$ с населенностью $N_л$. С полем накачки взаимодействуют уровни *1*, *2*, с полем излучения — *2*, *3*. Пусть скорость вращательной релаксации Γ_R одинакова для всех уровней.

Накачиваемое колебательное состояние $\nu_л$ взаимодействует с другими вследствие процессов $V-V$-релаксации. Для простоты будем

учитывать взаимодействие $\nu_л$ с возбужденными состояниями $\nu_в$, $\nu_н$, энергетически расположенными выше (в) и ниже (н) накачиваемого, с населенностями $N_в$, $N_н$. Скорости взаимодействия $V-V$-процессов $\nu_л \to \nu_в$, $\nu_в \to \nu_л$, $\nu_л \to \nu_н$, $\nu_н \to \nu_л$ обозначим через $\Gamma_{лв}$, $\Gamma_{вл}$, $\Gamma_{лн}$, $\Gamma_{нл}$. Каждое из возбужденных состояний взаимодействует с основным вследствие процессов колебательной релаксации. Скорость перехода возбужденного состояния в основное Γ будем считать одинаковой для всех состояний. Предположим, что накачка производится в центр линии поглощения, а статистические веса вращательных уровней g_1, g_2, g_3 примерно одинаковы. Пренебрегаем из



менением населенности, вызванной лазерным переходом. Тогда кинетические уравнения примут вид

$$\frac{dn_{12}}{dt} = -(\Gamma_R + 2W)\, n_{12} + f_1 \Gamma_R N_0 - f_2 \Gamma_R N_л;$$

$$\frac{dn_{23}}{dt} = -W n_{23} + (f_2 - f_3)\, \Gamma_R N_л;$$

$$\frac{dN_л}{dt} = W n_{12} - (\Gamma_{лв} N_л - \Gamma_{вл} N_в) - (\Gamma_{лн} N_л - \Gamma_{нл} N_н) - \Gamma N_л; \qquad (4)$$

$$\frac{dN_в}{dt} = \Gamma_{лв} N_л - \Gamma_{вл} N_в - \Gamma N_в;$$

$$\frac{dN_н}{dt} = \Gamma_{лн} N_л - \Gamma_{нл} N_н - \Gamma N_н,$$

где $n_{12} = n_1 - n_2$, $n_{23} = n_2 - n_3$, а W — скорость накачки.

В этой системе искомым является величина n_{23}, входящая в выражение для коэффициента усиления. Ее решение, найденное в стационарном режиме, следующее:

$$n_{23} = \frac{1 + \Gamma_{лв}/(\Gamma_{вл} + \Gamma + \Gamma_{лн})/(\Gamma_{нл} + \Gamma) - (f_3 g_2/g_3 - f_2)\, \Gamma_R/\Gamma}{1 + \frac{W}{W_S}\left(1 - \frac{1}{2\left(1 + \frac{1}{\Gamma_{лв}/(\Gamma_{вл} + \Gamma) + \Gamma_{лн}/(\Gamma_{нк} + \Gamma)}\right)}\right)}. \qquad (5)$$

Из этой формулы следуют уточненные соотношения, первое из которых определяет условие положительного усиления:

$$(f_3g_2/g_3 - f_2)\,\Gamma_R/\Gamma < (1 + \Gamma_{лв}/\Gamma_{вл} + \Gamma) + \Gamma_{лн}/(\Gamma_{нл} + \Gamma)), \qquad (6)$$

а второе — насыщающую скорость накачки $W_{S(V-V)}$

$$\frac{W_{S(V-V)}}{W_S} = \left(1 - \frac{1}{2\left(1 + \frac{1}{\Gamma_{лв}/(\Gamma_{вл} + \Gamma) + \Gamma_{лн}/(\Gamma_{нл} + \Gamma)}\right)}\right)^{-1}. \qquad (7)$$

В правых частях этих выражений слагаемые, следующие за единицей, являются поправками к формулам (2), (3), обусловленными взаимодействием с соседними колебательными состояниями. В них также выделены члены, описывающие взаимодействие с каждым из состояний. Полагая поочередно скорости $\Gamma_{лв}$, $\Gamma_{вл}$ или $\Gamma_{лн}$, $\Gamma_{нл}$ равными нулю, можно с помощью (6), (7) определить вклад в поправки, связанный с взаимодействием только с нижним или только с верхним состоянием.

Для нахождения поправок, даваемых выражениями (6), (7), необходимо знать скорости $V - V$-процессов, используемых в ЛОН молекул. В литературе имеются данные только для наиболее изученной молекулы CH_3F [2]. Для ряда других молекул типа симметричного волчка (CH_3Cl, CH_3Br, CH_3J) в работе [3] приведены скорости возбуждения и опустошения колебательных состояний при импульсной накачке в состояние ν_6 CO_2-лазером. Рассматриваемая модель ЛОН позволяет на основании значений этих скоростей определить скорости $V - V$-релаксации указанных молекул. Результаты этого расчета вместе с данными, известными для молекулы CH_3F, представлены в табл. 1. Здесь размерность скоростей

Таблица 1

Молекула	$\Gamma_{вл}$	$\Gamma_{лв}$	$\Gamma_{лн}$	$\Gamma_{нл}$	Γ
CH_3F	277	292	—	—	0,59
CH_3Cl	137,5	12,5	59	27	7,5
CH_3Br	91	8	32	12	22
CH_3J	89	7,5	32	12	20

V—V- и V-релаксаций дана в $(мс)^{-1}\cdot Па^{-1}$. Результаты расчетов, характеризующие учет $V - V$-процессов для указанных молекул, показаны в табл. 2. Через Δ, δ обозначены правые части выражений (4), (5). Подстрочные индексы в или н указывают соответствующие взаимодействующие состояния. Отличие этих коэффициентов от единицы определяют добавки, связанные с учетом V — V-процесса.

Проанализируем полученные результаты. Для молекул CH_3Cl, CH_3Br, CH_3J между накачиваемым и основным колебательным состояниями имеется промежуточное состояние ν_3, с которым состояние ν_6 взаимодействует за счет $V - V$-процессов. Из табл. 1

Таблица 2

Молекула	$\Delta_{вн}$	$\Delta_{в}$	$\Delta_{н}$	$\delta_{вн}$	$\delta_{в}$	$\delta_{н}$
CH_3F	1,95	1,95	1	1,32	1 32	1
CH_3Cl	2,80	1,09	2,71	1,47	1,01	1,46
CH_3Br	2,01	1,07	1,94	1,34	1,02	1,32
CH_3J	2,06	1,07	1,99	1,35	1,02	1,33

следует, что для указанных молекул $\Gamma_{лн} > \Gamma_{нл}$ и основной вклад обусловлен именно этим взаимодействием. Что же касается взаимодействия накачиваемого состояния ν_6 с верхним возбужденным колебательным состоянием ν_2, то здесь $\Gamma_{лв} \ll \Gamma_{вл}$, и вклад от этого взаимодействия незначителен (несколько процентов). Можно показать, что вклад от взаимодействия ν_6 с колебательными состояниями, расположенными выше ν_2, еще меньше. Поэтому при построении модели, учитывающей $V - V$-процессы таких лазеров, достаточно ограничиваться учетом только колебательного состояния ν_3.

В молекуле CH_3F между основным и накачиваемым ν_3 колебательными состояниями, других промежуточных состояний нет. Поэтому взаимодействие здесь может иметь место только с верхними колебательными состояниями, ближайшим из которых является состояние ν_6. Ввиду малого энергетического зазора между состояниями ν_3 и ν_6, а также в связи с тем, что состояние ν_6 двукратно вырождено, для этой молекулы $\Gamma_{лв} > \Gamma_{вл}$ (табл. 1). По этой причине, а также из-за малости значения Γ для молекулы CH_3F основной вклад обусловлен взаимодействием ν_3 и ν_6. Можно показать, что учет взаимодействия с другими возбужденными колебательными состояниями здесь незначителен.

Таким образом, выражение (5) позволяет по известным значениям скоростей $V - V$-процессов определить их влияние на пороговое условие, а также насыщающую скорость накачки и выбрать модель лазера, ограничившись минимальным числом взаимодействующих колебательных состояний. Для рассмотренных молекул расчет показал, что пороговые условия без учета $V - V$-релаксации завышаются более, чем в два раза, а насыщающая скорость накачки занижается (иногда в 1,5 раза).

Данные расчеты справедливы при больших давлениях газа, когда диффузией можно пренебречь ввиду преобладающего влияния колебательно-поступательной релаксации. По мере снижения давления скорости диффузии возрастают, поэтому в области низких давлений роль $V - V$-процессов снижается.

Список литературы: 1. *Смит К., Томсон Р.* Численное моделирование газовых лазеров.— М.: Мир, 1981.— 516 с. 2. *Flynn G.* Collision Dynamics of Intermode Energy Flow in Laser Pumped Polyatomic Molecules: CH_3F // I. of Chem. Phys.— 1980.—72, N 2.— P. 1175—1186. 3. *Earl B. L., Rohn A. T.* Intermode Vibrational Crossing in CH_3Br // Chem. Phys.— 1976.— 12, N 1.— P. 113—121.

Поступила в редколлегию 22.01.86.