

РОЛЬ ДИССОЦИАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ОБРАЗОВАНИИ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЁННОСТИ В CO_2 - ЛАЗЕРАХ

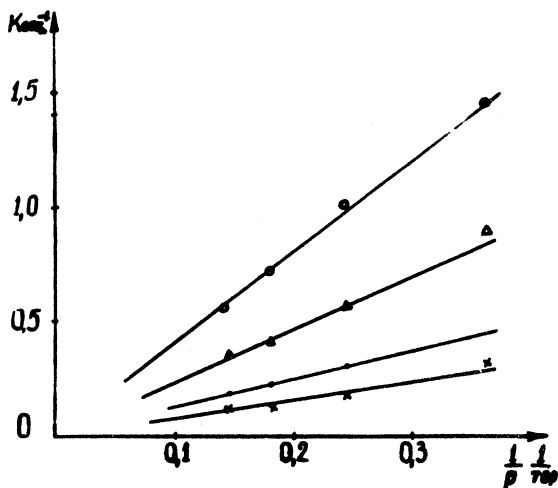
Э. Н. Лоткова, В. Н. Очкин, Н. Н. Соболев

Процессы создания инверсной населённости в плазме газового разряда ОКГ на CO_2 сопровождаются процессами изменения химического состава его активной среды. При этом основные изменения претерпевает вследствие диссоциации главный компонент лазерной смеси — CO_2 (обычно применяются смеси, содержащие CO_2 , N_2 , и He). В работах¹ была исследована диссоциация CO_2 как в отпаянной, так и в проточной системах в зависимости от многих параметров — скорости протока газа, тока разряда, давления газа, диаметра разрядной трубки и т.д. Было показано, что процессы диссоциации существенно влияют на лазерные характеристики и должны учитываться как при практических использованиях CO_2 -лазера, так и при рассмотрении механизма его работы. Для того, чтобы произвести такой учёт, необходимо знание скоростей процессов диссоциации в электрическом разряде. Эти сведения можно получить из начальных участков кинетических кривых $N_{\text{CO}_2}(t)$, где N_{CO_2} — концентрация молекул CO_2 , t — время пребывания молекул CO_2 в зоне разряда, когда концентрации CO и O малы и обратная реакция ассоциации даёт ещё малый вклад.

$$N_{\text{CO}_2}(t) = N_{\text{CO}_2}(0) e^{-K_D t}, \quad (1)$$

где $K_D = n_e \langle v_e \sigma_d \rangle$, n_e — плотность электронов,

а $\langle v_e \sigma_d \rangle$ - усреднённое по скоростям электронов эффективное сечение процесса диссоциации. Значения K_D в зависимости от состава смесей, тока разряда и давления получены нами для



Р и с. 1. Зависимость скорости диссоциации от давления и тока в трубке диаметром 22 мм для смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He} (2:1:8)$

○ - I = 40 ма, △ - I = 20 ма,
● - I = 10 ма, × - I = 5 ма, P - полное давление смеси

трубок различного диаметра. Так на рис.1 приведены значения K_D в зависимости от давления смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He} (2:1:8)$ при различных токах в трубке диаметром 22 мм. Следует указать, что при прочих равных условиях - плотности тока j , давления газа P - скорость диссоциации увеличивается при уменьшении диаметра разрядной трубки.

Для выяснения влияния диссоциации CO_2 на характеристики активной среды CO_2 - лазера нами был про-

изведён расчёт кинетики заселения колебательных уровней молекул, принимающих участие в образовании инверсной населённости. В основу расчёта положен механизм возбуждения молекулярных колебаний прямым электронным ударом, предложенный в работе². Мы пользовались методом, согласно которому рассмотрение кинетики процессов заселения производится не для каждого колебательного уровня в отдельности, а для целой группы уровней, относящихся к определённому типу нормальных колебаний молекул³.

В целях улучшения методики расчёта, предложенного в работе³, который давал неудовлетворительное в количественном отношении согласие с экспериментом, нами был произведён учёт ряда дополнительных факторов. Так, в качестве основной задачи был поставлен вопрос о роли диссоциации, чем в работе³ пренебрегалось. Произведён учёт немаксвелловости⁴ распределения электронов по скоростям в разряде, а также возможности возбуждения электронным ударом не только молекул N_2 , но и CO и CO_2 . Использование в большинстве случаев экспериментальных значений вероятностей элементарных процессов и их температурных зависимостей⁵ позволило эффективно учесть все каналы этих процессов и, в частности, учесть влияние столкновений CO_2 с CO , N_2 и He на разрушение верхнего лазерного уровня. Для того, чтобы учесть роль высоких колебательных уровней, нами было произведено суммирование уравнений баланса по всем уровням нормальных типов колебаний с учётом релаксации и обмена при столкновениях между молекулами различного сорта. Анализ вероятностей релаксационных процессов для различных типов колебаний молекул CO_2 ⁵ показывает, что в обычно применяемых лазерных смесях разрушение симметричных и деформационных колебательных уровней достаточно эффективно. Это позволяет считать, что во многих практически интересных случаях их заселённость близка к равновесной и определяется температурой поступательных степеней сво-

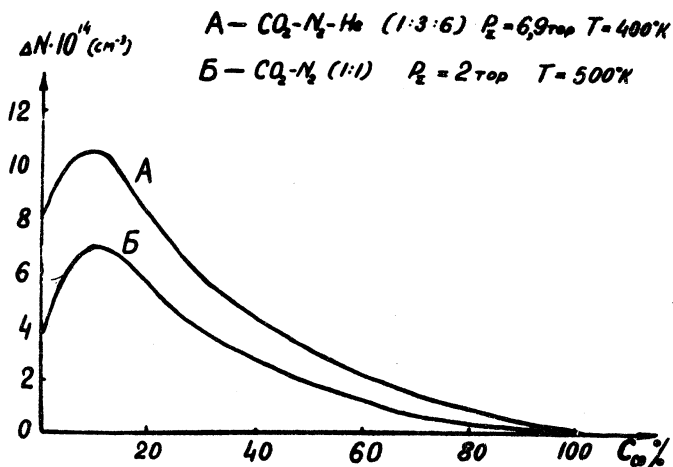
боды. Это позволяет уменьшить число уравнений баланса и тем самым упростить решение задачи. В таком случае система уравнений баланса для энергий, заключённых в различных типах колебаний молекул, имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \int \frac{dE_i}{dt} dV = h\nu_i \left\{ \alpha_i N_{oi} K^{ei} \int n_e(r) dV - K^{ie} \int N_i(r) n_e(r) dV \right\} - \\ - A_i D_i \int \nabla^2 N_i(r) dV \left\{ \frac{1}{V} + \sum_j K_r^{ji} \left[\frac{\bar{E}_j}{E_j} N_j - E_j \right] - \right. \\ \left. - K_l \left[E_i - \bar{E}_i \right], \quad K_l^i = \sum_m K_l^{im} \right. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь индексы i и j могут принимать значения 3, 4 и 5, что обозначает антисимметричные колебания CO_2 , а также N_2 и CO соответственно; ν_i — частота колебаний; N_{oi} — число осцилляторов i -го сорта в основном состоянии в 1 см^3 ; $K^{ei} = \langle \nu_e \sigma_1 \rangle$ — усреднённое по скоростям электронов сечение возбуждения i -го типа колебаний; K^{ie} — то же для разрушения; E_i — энергия, заключённая в i -м типе колебаний; \bar{E}_i — равновесная энергия; n_e — плотность электронов, N_i — концентрация возбуждённых молекул; D_i — коэффициенты диффузии; α_i — учитывает эффективное число квантов на один акт возбуждения электронным ударом; K_r^{ji} и K_l^i — скорости обмена энергией между различными типами колебаний и релаксации соответственно; A_i — учитывает эффективное число квантов, переносимых за счёт диффузии к стенкам и вероятность деактивации колебаний на стенках, V_m — доля молекул m -го сорта в смеси.

Первоначально для сравнения нашего расчёта с расчётом в работе³ и экспериментом⁶ система (2) была решена без учёта диссоциации CO_2 . Даже в этом случае полученные результаты значительно лучше описывают экспериментальные зависимости (с точностью до коэффициента 2).

Говоря строго, кинетические уравнения должны содержать члены, описывающие изменения во времени числа молекул в результате диссоциации. Это привело бы к тому, что система уравнений (2) стала бы нестационарной, что усложнило бы её решение. В данном

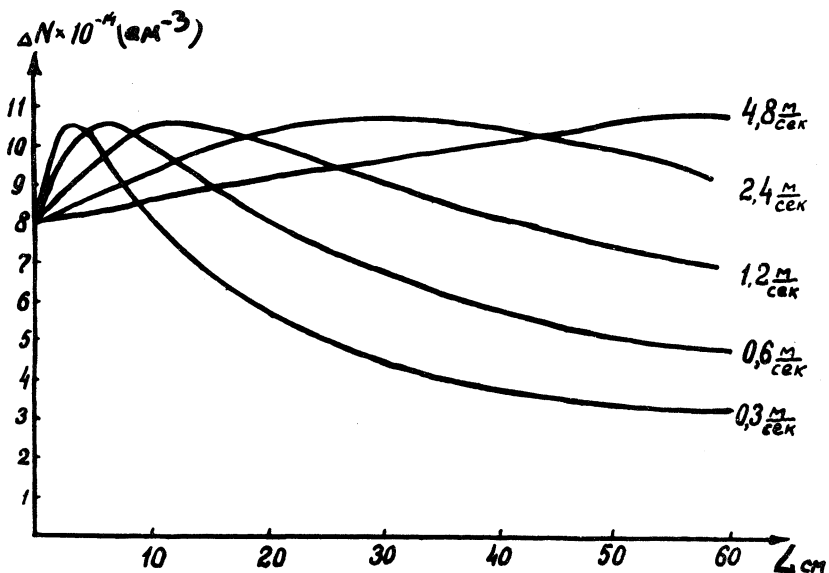


Р и с. 2. Зависимость инверсной населённости ΔN от степени превращения CO_2 в CO (за 100% принято количество CO_2 в отсутствии разряда)

случае, однако, возможен другой путь. А именно, система (2) может быть решена для ряда случаев, соответствующих различным степеням диссоциации CO_2 в элементе объёма, а затем, имея данные по кинетике диссоциации, легко определить зависимость величины инверсии в элементе объёма от времени пребывания смеси в разряде. Такое разделение задачи оказывается возможным потому, что характерные времена установления стационарной степени диссоциации значительно превышают времена, характерные для процессов релаксации и обмена колебательной энергии, т.е. $K_7, K_8 \gg K_9$.

На рис. 2 показаны результаты расчёта инверсной населённости уровней 00^0_1 и 10^0_0 для смесей $\text{CO}_2 - \text{N}_2 -$

- He и $\text{CO}_2 - \text{N}_2$ в зависимости от степени диссоциации CO_2 . Видно, что зависимость не монотонна и имеет максимум при малой степени превращения CO_2 в CO .



Р и с. 3. Распределение плотности ΔN инверсии по длине разрядной трубки при различных скоростях протока.

Трубка ϕ 22 мм, $L = 60$ см, ток $I = 30$ ма.

Исходная смесь $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ (1:3:6) при давлении 6,9 тор

Этот максимум обусловлен тем, что молекулы CO очень эффективно возбуждаются электронным ударом, осуществляя за счёт обмена накачку энергии в антисимметричный тип колебаний молекул CO_2 . Однако, дальнейшее увеличение степени диссоциации отрицательно сказывается на инверсии, во-первых, за счёт уменьшения количества CO_2 и, во-вторых, из-за конечной скорости разрушения верхнего лазерного уровня при столкновениях $\text{CO}_2 - \text{CO}$.

Тот факт, что как это ясно из измеренных скоростей диссоциации, времена установления стационарной степени диссоциации соизмеримы со временем пребывания газа в разряде при прокачке, указывает на существенную неоднородность состава газа по длине разрядной трубки в случае проточного лазера. Пользуясь кинетическими кривыми, описывающими ход диссоциации и кривыми на рис.2, легко найти распределение плотности инверсии по длине лазерной трубки. Такие распределения для трубки длиной 60 см при различных скоростях протока приведены на рис.3. Оказывается, таким образом, что те сведения, которые получаются из экспериментов по усилению, дают некоторую усреднённую по длине L плотность инверсии.

Немонотонность зависимости инверсии от степени диссоциации углекислого газа указывает на возможность оптимизации режимов работы CO_2 - лазера по этому параметру за счёт подбора условий разряда, влияющих на диссоциацию (ток, давление и состав исходных смесей, диаметр разрядной трубки). В случае проточного лазера это может быть достигнуто также за счёт подбора скорости прокачки газа. Работа отпаянного лазера, кроме того, может быть улучшена, например, за счёт введения небольших количеств водорода или паров воды, влияющих на диссоциацию¹.

Авторы приносят благодарность В. В. Соковикову за многочисленные советы и обсуждения.

Поступила в редакцию 21 ноября 1969 г.

После переработки 23 января 1970 г.

Л и т е р а т у р а

1. Гасилевич Е. С., Иванов В. А., Лоткова Э.Н., Очкун В. Н., Соболев Н. Н., Ярославский Н. Г. Препринт ФИАН №42, 1968 г. ЖТФ, 39, 126 (1969).
2. Соболев Н. Н., Соковиков В. В. Письма ЖЭТФ, 4, 303 (1966); УФН, 91, 425 (1967).

3. Gordietz B.F., Sobolev N.N., Sokovikov V.V.,
Shelepin L.A. Phys. Letts, 25A, 173 (1967) ;
Препринт ФИАН, 1967; ЖЭТФ, 53, 1822 (1967).
4. Брусилловская Л. М., Новгородов М. З., Свири-
дов А. Г., Соболев Н. Н. Препринт ФИАН, №32
(1968); Письма ЖЭТФ, 8, 341 (1968).
5. Shulz Y.J. Phys. Rev., 135A, 988 (1964).
Boness M.J.W., Shulz Y.J. Phys.Rev.Letts., 21, 1031
(1968).
Moore C.B., Wood R.F., Hu B.L.B., Yardley J.T.
J. Chem. Phys., 46, 4222 (1967).
Cheo P.K. IEEE QE - 4, 587 (1968).
Rosser W.A., Wood A.D., Gerry E.T. IEEE QE - 4,
7G - 5 (1968).
6. Антропов Е. Т., Силин-Бекчурин И. А., Сокови-
ков, В. В., Соболев Н. Н. Препринт ФИАН, №43,
(1968). Phys.Letts., 26A, 359 (1968).