

ИНВЕРСНАЯ НАСЕЛЕННОСТЬ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

В.К.Конюхов, А.М.Прохоров

В последнее время было предложено несколько новых способов получения инверсной населенности [1-3]. В этой статье показано, что в некоторых смесях молекулярных газов при адиабатическом расширении возникает и некоторое время существует состояние инверсной населенности по колебательным уровням. Для этого молекулы смеси должны иметь существенно различные времена колебательной релаксации и обладать способностью обмениваться энергией колебательного возбуждения.

Эффективная передача колебательного возбуждения между молекулами различного сорта происходит в том случае, если энергии колебательных уровней молекул близки друг к другу. Точнее, для резонансного обмена энергией колебательного возбуждения должно выполняться условие $|\Delta E| \ll kT$, где ΔE - дефицит энергии.

В качестве примера резонансного обмена колебательным возбуждением можно привести смеси азот-двуокись углерода и азот-двуокись азота [4]. У первой смеси обмен происходит между уровнем $v = 1$ молекулы N_2 и уровнем ($0\ 0^0 I$) молекулы CO_2 . При комнатной температуре вероятности передачи при одном столкновении молекул $\alpha \sim 10^{-5}$ [4].

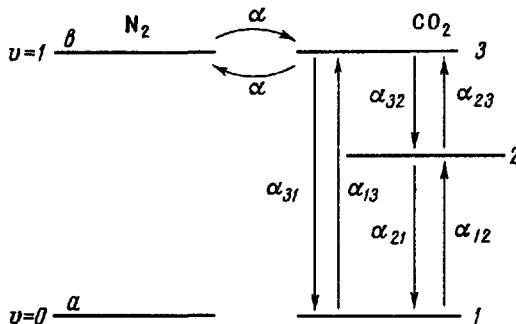
Для простоты предположим, что концентрация молекул-носителей колебательного возбуждения в смеси много больше, чем концентрация рабочих молекул, по чьим уровням возникает состояние инверсии, тогда при описании релаксационных процессов концентрацию возбужденных молекул-носителей в смеси можно считать неизменной во времени.

Уравнения, которые описывают изменение числа молекул рабочего газа на трех колебательных уровнях, один из которых (третий) может обмениваться колебательным возбуждением с уровнем β молекулы-носителя (см. рисунок), запишутся следующим образом:

$$\frac{dn_3}{dt} = -\omega_{ab} n_3 + \omega_{ba} n_1 - \omega_{31} n_3 + \omega_{13} n_1 - \omega_{32} n_3 + \omega_{23} n_2,$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \omega_{32} n_3 + \omega_{12} n_1 - \omega_{23} n_2 - \omega_{21} n_2; \quad n_1 + n_2 + n_3 = n.$$

Здесь ω_{ba} – вероятность возбуждения рабочей молекулы из-за столкновений с молекулами-носителями, находящимися в возбужденном состоянии; ω_{ab} – вероятность обратной передачи возбуждения от рабочей молекулы к молекулам-носителям; ω_{31} , ω_{13} , ω_{32} и т.д. – вероятности тепловой релаксации рабочей молекулы между соответствующими колебательными уровнями.



Пусть процесс адиабатического расширения газовой смеси происходит настолько быстро, что интервал времени, за который газ охлаждается от начальной температуры T_1 до конечной T_2 , существенно меньше, чем время собственной колебательной релаксации молекул газа-носителя. Через небольшой промежуток времени после окончания расширения газовой смеси в газе установится стационарное распределение по колебательным уровням рабочих молекул.

Величину инверсии между уровнями β и 2 находим обычным способом, приравнивая нулю правые части уравнений, тогда

$$\frac{n_3 - n_2}{n_1} = \frac{\alpha (\alpha_{21} - \alpha_{32})}{\alpha_{21} (\alpha + \alpha_{32} + \alpha_{31})} \exp \left(-\frac{E_\beta - E_a}{kT_1} \right),$$

где $\alpha_{21}, \alpha_{32}, \alpha_{31}$ — вероятности релаксации за одно соударение. Предполагается, что конечная температура T_2 газовой смеси такая, что тепловым возбуждением молекулы, т.е. вероятностями w_{13}, w_{23}, w_{12} можно пренебречь, но дезактивизирующими соударениями пренебрегать нельзя, и $kT_2 \gg |\Delta E|$. Из формулы видно, что инверсия между уровнями 3 и 2 получить невозможно, если $\alpha_{32} > \alpha_{21}$. Если выполняется обратное неравенство $\alpha_{21} \gg \alpha_{32}$ и вероятность α передачи колебательного возбуждения много больше, чем вероятность дезактивации уровня 3 рабочей молекулы, то инверсия достигает наибольшего значения и равна относительной концентрации возбужденных молекул газоносителя при начальной температуре T_2 .

Покажем на примере газовой смеси из азота и углекислого газа, что методом адиабатического расширения можно получить инверсию населенность между уровнями (0^0) и (10^0) молекулы CO_2 и определим ее величину для $T_1 = 1000^0\text{K}$ и $T_2 = 300^0\text{K}$. При конечной температуре газовой смеси порядка комнатных $\alpha_{21} > \alpha_{32}$, так как на этом оптическом переходе молекулы CO_2 работает газовый лазер на смеси N_2 и CO_2 при возбуждении электрическим разрядом [5]. Вероятность дезактивации молекулы CO_2 за одно соударение $\sim 10^{-5}$ для сухого газа [6], поэтому $(n_3 - n_2)/n_1 \sim 1\%$, максимальное значение равно 3,5%.

В заключение следует отметить, что непрерывный режим адиабатического расширения газовой смеси можно осуществить, пропуская газ через сверхзвуковое сопло.

Авторы выражают признательность Л.А.Кулевскому и В.М.Марченко за дискуссии.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступило в редакцию

31 марта 1966 г.

Литература

- [1] Н.Г.Басов, А.Н.Ораевский. ЖЭТФ, 44, I742, 1963.
- [2] Chemical Lasers, Appl. Opt., supplement 2, 1965.

- [3] I.R. Hurle, A.Hertzberg. Phys. Fluids, 8, 1601, 1965.
- [4] J.E. Morgan, H.I. Schiff. Canad. J.Chem., 41, 903, 1963.
- [5] C.K.N. Patel. Phys.Rev., 136A, 1187, 1964.
- [6] T.L. Cottrell, J.C. Mc Coubrey. Molecular Energy Transfer in Gases, London, 1961.