

# О температурной зависимости столкновительных ширин линий лазерного перехода $10^0 - 00^01$ молекулы $\text{CO}_2$

К.И.Аршинов, М.К.Аршинов, В.В.Невдах

С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера измерены ненасыщенные коэффициенты поглощения в чистом углекислом газе и в бинарных смесях  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2 - \text{He}$  при давлении 100 Тор в диапазоне температур 300–700 К. Для линии поглощения R(22) перехода  $10^0 - 00^01$  молекулы  $\text{CO}_2$  определены относительные коэффициенты столкновительного уширения буферными газами  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$  и их температурные зависимости.

**Ключевые слова:** коэффициент поглощения, столкновительная ширина линий, углекислый газ, азот, гелий.

## 1. Введение

Известно, что практически все технологические  $\text{CO}_2$ -лазеры с любым типом возбуждения работают при давлении активной среды, обеспечивающих однородное уширение их линий усиления за счет столкновений рабочих молекул  $\text{CO}_2$  с другими атомами и молекулами активной среды [1–4].

Зависимость столкновительной ширины  $\Delta\nu_{\text{CO}_2}$  (полная ширина на половине максимума) спектральной линии молекулы  $\text{CO}_2$  от температуры газа  $T$  обычно описывается формулой [5]

$$\Delta\nu_{\text{CO}_2} = \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} p_{\text{CO}_2} (300 \text{ K}/T)^n, \quad (1)$$

где  $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$  – столкновительная ширина линии за счет столкновения молекул  $\text{CO}_2$  между собой при давлении 1 Тор и температуре 300 К, или коэффициент столкновительного самоуширения для молекулы  $\text{CO}_2$ ;  $p_{\text{CO}_2}$  – давление углекислого газа. Показатель степени  $n$  в (1) зависит от механизма взаимодействия сталкивающихся молекул и для линий перехода  $10^0 - 00^01$  по разным данным составляет от 0.5 до 1 [5–12].

Известно также, что основными компонентами активных сред эффективных технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров являются углекислый газ, азот и гелий в различных соотношениях при давлениях, при которых преобладают бинарные столкновения атомов и молекул [1]. Поэтому полная столкновительная ширина контура усиления  $\Delta\nu_g$  линии лазерного перехода в данных условиях может быть представлена в виде суммы вкладов в уширение, даваемых парными столкновениями атомов и молекул основных компонентов, т. е. в виде

$$\Delta\nu_g \approx \Delta\nu_{\text{CO}_2} + \Delta\nu_{\text{N}_2} + \Delta\nu_{\text{He}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\nu_{\text{N}_2}$  и  $\Delta\nu_{\text{He}}$  – ширины, обусловленные столкновениями молекул  $\text{CO}_2$  с буферными молекулами  $\text{N}_2$  и атомами  $\text{He}$  соответственно.

Для численных оценок ширины линии усиления таких  $\text{CO}_2$ -лазеров на наиболее сильном лазерном переходе  $00^01 - 10^00$  обычно используют формулу, полученную в работе [13] для линии R(20) этого перехода:

$$\Delta\nu_g = \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} (\xi_{\text{CO}_2} + b_{\text{N}_2} \xi_{\text{N}_2} + b_{\text{He}} \xi_{\text{He}}) p_{\Sigma} \sqrt{300/T}, \quad (3)$$

где  $\xi_{\text{CO}_2}$ ,  $\xi_{\text{N}_2}$ ,  $\xi_{\text{He}}$  – доли  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$  в смеси;  $b_{\text{N}_2} = \gamma_{\text{CO}_2-\text{N}_2} / \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} = 0.73$  и  $b_{\text{He}} = \gamma_{\text{CO}_2-\text{He}} / \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} = 0.64$  – относительные коэффициенты столкновительного уширения линий молекул  $\text{CO}_2$  молекулами и атомами буферных газов  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$  соответственно;  $p_{\Sigma}$  – давление газовой смеси  $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ .

То, что коэффициенты  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  входят в формулу (3) как константы, по существу означает признание одинаковости температурных зависимостей величин  $\Delta\nu_{\text{CO}_2}$ ,  $\Delta\nu_{\text{N}_2}$  и  $\Delta\nu_{\text{He}}$  из (2), т. е. признание одинакового характера уширения спектральной линии при взаимодействии молекул  $\text{CO}_2$  со столкновительными партнерами, обладающими различными свойствами, а это противоречит существующим представлениям о механизмах столкновительного уширения спектральных линий [5, 6].

Столкновительную ширину линии обычно определяют или непосредственно, измеряя форму линии поглощения с помощью перестраиваемого источника излучения, или измеряя ненасыщенный коэффициент поглощения (КП) на одной, например центральной, частоте линии поглощения при давлении, обеспечивающем столкновительно-уширенный контур. Измерение всего контура спектральной линии молекулы  $\text{CO}_2$  с высокой точностью является более сложной экспериментальной задачей, чем измерение КП на одной частоте. Для линий переходов  $[10^00, 02^00]_{\text{I,II}} - 00^01$  [3] задача облегчается тем, что в качестве зондирующего излучения можно использовать резонансное излучение стабилизированного по частоте  $\text{CO}_2$ -лазера, перестраиваемого по линиям этих же переходов.

К.И.Аршинов, М.К.Аршинов. Институт технической акустики НАНБ, Белоруссия, 210023 Витебск, просп. Людникава, 13; e-mail: itaaki@yandex.ru

В.В.Невдах. Белорусский национальный технический университет, Белоруссия, 220013 Минск, ул. Я.Коласа, 22; e-mail: v.v.nev.@bk.ru

Поступила в редакцию 11 марта 2010 г.

Цель настоящей работы – определение относительных коэффициентов  $b_{N_2}$  и  $b_{He}$  столкновительного уширения линии поглощения R(22) перехода  $10^00 - 00^01$  молекулы  $CO_2$  молекулами  $N_2$  и атомами He соответственно в диапазоне температур 300–700 К, характерном для активных сред электроразрядных технологических  $CO_2$ -лазеров.

## 2. Методика измерений и обсуждение полученных результатов

Методика основана на измерениях с помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого  $CO_2$ -лазера КП на центральной частоте линии R(22) перехода  $10^00 - 00^01$  в чистом  $CO_2$  ( $\alpha_{CO_2}$ ) и в бинарных смесях  $CO_2 - N_2$ ,  $CO_2 - He$  ( $\alpha_{CO_2-M}$ ) с соотношениями компонентов  $CO_2:M = 1:Y$  при давлениях чистого  $CO_2$  и бинарных смесей ( $p_{\Sigma}$ ) 100 Тор, обеспечивающих лоренцевские контуры линий поглощения.

Относительные коэффициенты столкновительного уширения линии  $b_M$  буферными газами  $N_2$  и He определялись из выражения

$$\frac{\alpha_{CO_2}}{\alpha_{CO_2-M}} = 1 + Yb_M. \quad (4)$$

Выбор линии R(22) обусловлен тем, что вкладом в КП на ее центральной частоте, который дают линии поглощения других, вышележащих переходов молекулы  $CO_2$ , при рассматриваемых в работе давлениях и температурах, можно пренебречь.

Следует также отметить, что при использовании данной методики исключены погрешности, обусловленные неопределенностями в значениях спектроскопических параметров, определяющих измеряемые КП [14].

Экспериментальная установка для измерения КП в газах по двухлучевой компенсационной схеме на линиях генерации стабилизированного по частоте  $CO_2$ -лазера, перестраиваемого по линиям основных лазерных переходов  $00^01 - [10^00, 02^00]_{I,II}$ , была подробно описана в работах [15, 16]. Долговременная нестабильность частоты генерации лазера относительно центральной частоты линии генерации, резонансной центральной частоте линии поглощения, не превышала  $\pm 0.5$  МГц. Это позволяло при реализуемых экспериментально ширинах линий поглощения с высокой точностью считать, что измерения КП проводились на центральных частотах линий поглощения.

Погрешность определения давления газа  $\Delta p$  составляла  $\pm 0.5$  Тор. Температура газа в измерительной кювете поддерживалась с погрешностью  $\pm 0.4$  К (в диапазоне  $293 \text{ К} \leq T \leq 420 \text{ К}$ ) и  $\pm 0.9$  К (в диапазоне  $470 \text{ К} \leq T \leq 700 \text{ К}$ ).

На рис.1 представлены результаты измерений  $\alpha_{CO_2}$  в чистом углекислом газе при давлении  $p_{CO_2} = 100$  Тор в диапазоне температур 300–700 К. Измеренные коэффициенты  $\alpha_{CO_2-M}$  в бинарных смесях  $CO_2 - N_2$  и  $CO_2 - He$  с различными соотношениями компонентов при давлении смеси  $p_{\Sigma} = 100$  Тор и в том же температурном диапазоне показаны на рис.2 и 3 соответственно.

Для каждой температуры, при которой проводились измерения, в соответствии с формулой (4) строилась зависимость отношения  $\alpha_{CO_2}/\alpha_{CO_2-M}$  от величины  $Y$ . Значения коэффициентов  $b_{N_2}$  и  $b_{He}$  определялись по наклону соответствующих прямых.

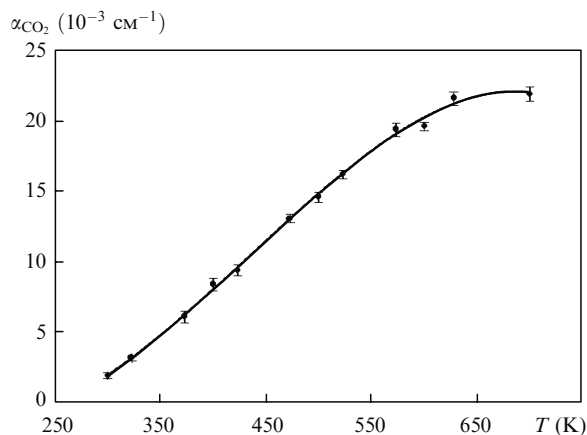


Рис.1. Температурная зависимость КП в чистом  $CO_2$  при давлении 100 Тор на линии 10R(22).

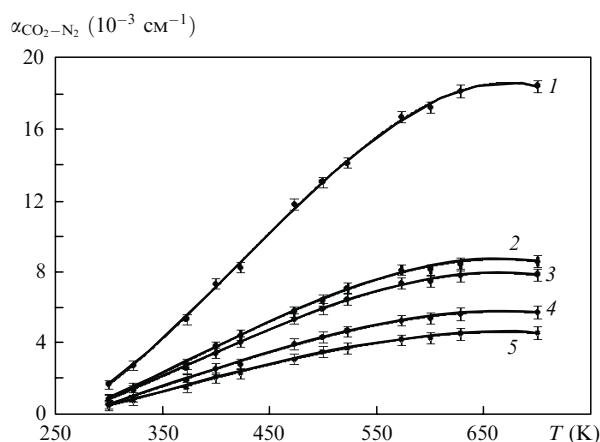


Рис.2. Температурные зависимости КП в газовой смеси  $CO_2:N_2 = 1:Y$  при давлении 100 Тор на линии 10R(22) для  $Y = 0.19$  (1), 1.5 (2), 1.78 (3), 3 (4) и 4 (5).

На рис.4,а в качестве примера приведены зависимости для смеси  $CO_2 - N_2$  при крайних значениях исследованного диапазона температур – 300 и 700 К. Из них получено, что  $b_{N_2} = 0.74 \pm 0.02$  при  $T = 300$  К и  $0.99 \pm 0.04$  при  $T = 700$  К. Аналогичные зависимости для смеси  $CO_2 - He$  представлены на рис.4,б. Из них получено, что  $b_{He} = 0.58 \pm 0.03$  при  $T = 300$  К и  $0.88 \pm 0.04$  при  $T = 700$  К.

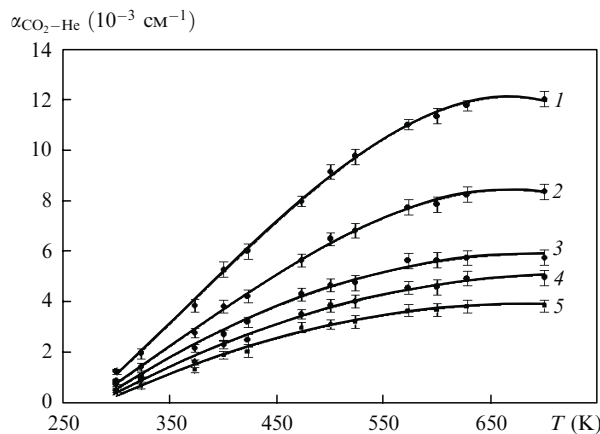


Рис.3. Температурные зависимости КП в газовой смеси  $CO_2:He = 1:Y$  при давлении 100 Тор на линии 10R(22) для  $Y = 1$  (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4) и 5 (5).

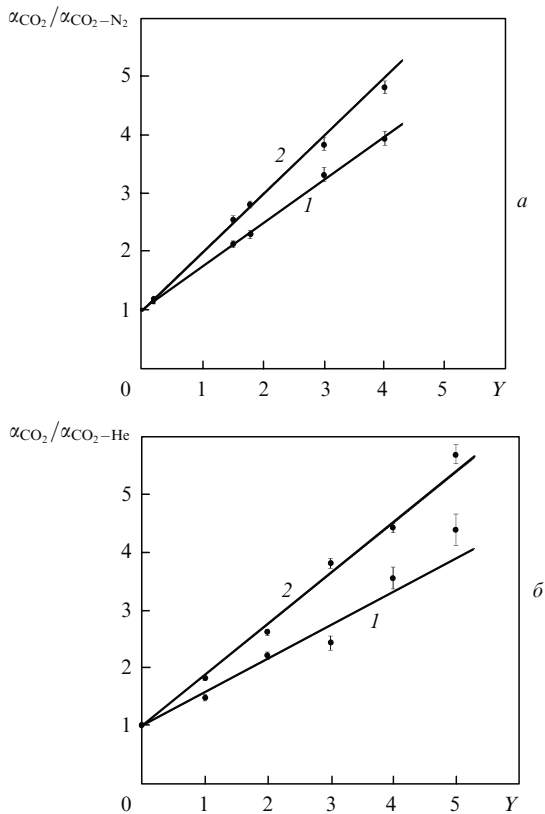


Рис.4. Зависимости отношения коэффициентов поглощения  $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-\text{M}}$  от отношения концентраций компонентов бинарной смеси  $Y = [\text{M}]/[\text{CO}_2]$  для  $\text{M} = \text{N}_2$  (а) и  $\text{M} = \text{He}$  (б) при температуре 300 (1) и 700 К (2).

Таким образом, экспериментальные данные, представленные на рис.4, ясно показывают, что в исследованном диапазоне температур 300–700 К отношения  $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-\text{N}_2}$  и  $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-\text{He}}$ , а значит, и коэффициенты  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  увеличиваются с ростом температуры газа.

Следует подчеркнуть, что автор работы [13], предложивший формулу (3), проводил измерения ширины линии R(20) перехода  $10^00 - 00^01$  в чистом  $\text{CO}_2$  и в бинарных смесях  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:1$  и  $\text{CO}_2:\text{He} = 1:1$  методом оптоакустической спектроскопии только при одной температуре –  $T = 298$  К. Позже в [17] по методике, аналогичной используемой в настоящей работе, были измерены коэффициенты  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  для нескольких линий, в том числе и для линии R(22) в интервале температур 300–650 К. При  $T = 300$  К авторы [17] получили  $b_{\text{N}_2} = 0.81 \pm 0.04$  и  $b_{\text{He}} = 0.70 \pm 0.04$ . Видно, что, хотя эти коэффициенты несколько больше полученных в настоящей работе, количественное согласие можно считать достаточно хорошим.

В то же время качественное сравнение результатов настоящей работы и работы [17], т. е. сравнение поведения коэффициентов  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  при изменении температуры, позволяет сделать принципиально различные выводы. Так, авторы [17] в исследованном ими диапазоне температур 300–650 К наблюдали только небольшие вариации  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$ , т. е. они установили, что эти коэффициенты практически не меняются. Характер же изменения полученных в настоящей работе коэффициентов  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  при изменении температуры иллюстрирует рис.5. Видно, что до температуры  $T \sim 550$  К коэффициент  $b_{\text{N}_2}$  практически не меняется, что согласуется с результатами работы [17],

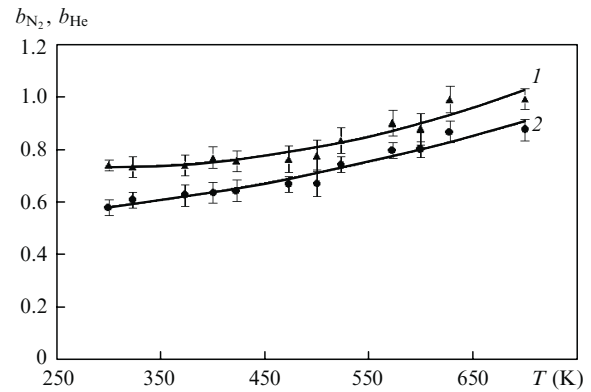


Рис.5. Температурные зависимости относительных коэффициентов столкновительного уширения линии поглощения  $10\text{R}(22)$  молекулы  $\text{CO}_2$  молекулами  $\text{N}_2$  (1) и атомами  $\text{He}$  (2).

а при  $T > 550$  К наблюдается его явное увеличение. Для коэффициента  $b_{\text{He}}$  слабая зависимость от температуры имеет место и в интервале  $T = 300 - 550$  К.

Таким образом, наши измерения однозначно показывают, что коэффициенты  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  являются функциями температуры, причем различными. Это означает, что широко используемая формула (3) при  $T > 550$  К оказывается некорректной. В соответствии с физическим смыслом выражения (2), в правильной формуле каждое слагаемое должно иметь собственную зависимость от температуры, точно так же, как собственные температурные зависимости имеют константы скорости колебательной релаксации верхнего лазерного уровня  $00^01$  молекулы  $\text{CO}_2$  в чистом  $\text{CO}_2$  и в бинарных смесях  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2 - \text{He}$  за счет столкновений (см., напр., [18]).

Для мощных технологических электроразрядных  $\text{CO}_2$ -лазеров, работающих в режиме быстрой прокачки активной среды, оптимальными оказываются активные среды, в которых содержание молекул  $\text{CO}_2$  намного меньше, чем молекул  $\text{N}_2$  и атомов  $\text{He}$ . Это смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} \approx 1:(5-22):(5-22)$  или смеси с еще меньшей долей рабочих молекул (см., напр., [19–22]). При получении максимальной лазерной мощности температура активной среды в данных лазерах достигает 600–700 К (см., напр., [23–25]). Простые оценки показывают, что столкновительные ширины линий усиления таких  $\text{CO}_2$ -лазеров, полученные по формуле (3) и с использованием результатов настоящей работы, могут различаться больше чем на 100 %.

### 3. Заключение

С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера измерены ненасыщенные КП в чистом углекислом газе и в бинарных смесях  $\text{CO}_2 - \text{N}_2$  и  $\text{CO}_2 - \text{He}$  при общем давлении 100 Тор в диапазоне температур 300–700 К на линии R(22) перехода  $10^00 - 00^01$  молекулы  $\text{CO}_2$ . Определены относительные коэффициенты столкновительного уширения  $b_{\text{N}_2}$  и  $b_{\text{He}}$  буферными газами  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$ . Установлено, что эти коэффициенты являются функциями температуры газа.

1. Siegman A.E. *Lasers* (Mill Valey, Cal.: University Science Book, 1986).
2. Hall D.R., Hill C.A., in *Handbook of Molecular Lasers* (New York: Marcell Dekker, 1987, Ch.3, p. 328).
3. Виттеман В. *CO2-лазер* (М.: Мир, 1990).
4. Plinski E.F., Abramski K.M. *DC-excited Continuous-wave Conventional and RF-excited Waveguide CO2 Lasers, Gas Lasers* (New York:

- CRC Press, 2007, p. 239).
5. Ачасов О.В., Кудрявцев Н.Н., Новиков С.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. *Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах* (Минск.: Наука и техника, 1985).
  6. Стариков В.И., Лаврентьева Н.Н. *Столкновительное уширение спектральных линий поглощения молекул атмосферных газов* (Томск: изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006).
  7. Буланин М.О., Булычев В.П., Ходос Э.Б. *Оптика и спектроскопия*, **48**, 732 (1980).
  8. Осипов В.М. *Оптика и спектроскопия*, **63**, 1013 (1987).
  9. Arie E., Lacombe N., Levy A. *Appl. Opt.*, **26**, 1636 (1987).
  10. Gross L.A., Griffiths P.R. *Appl. Opt.*, **26**, 2250 (1987).
  11. Rosenmann L., Perrin M.Y., Taine J. *J. Chem. Phys.*, **88**, 2995 (1988).
  12. Аршинов К.И., Лешенюк Н.С. *Квантовая электроника*, **24**, 517 (1997).
  13. Abrams R.L. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 609 (1974).
  14. Ельяшевич М.А. *Атомная и молекулярная спектроскопия* (М.: ГИФМЛ, 1962).
  15. Аршинов К.И., Каблуков Н.Г., Лешенюк Н.С. *ПТЭ*, **1**, 237 (1991).
  16. Аршинов К.И., Каблуков Н.Г., Тихонов Ф.В. *ПТЭ*, **1**, 103 (1996).
  17. Robinson A.M., Weiss J.S. *Can. J. Phys.*, **60**, 1656 (1982).
  18. Невдах В.В., Орлов Л.Н., Лешенюк Н.С. *ЖПЭС*, **70**, 246 (2003).
  19. Nath A.K., Kumar M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1199 (1993).
  20. Markillie G.A.J., Baker H.J., Betterton J.G., Hall D.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 1134 (1993).
  21. Chang S.-H., Cheng C.-C., Chang M.-F., et al. *Jpn. J. Appl. Phys. Pt.1*, **39**, 82 (2000).
  22. Невдах В.В., Ганджали Монире. *ЖПЭС*, **71**, 490 (2004).
  23. Harry J.E., Evans D.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 503 (1988).
  24. Abramski K.M., Colly A.D., Baker H.J., Hall D.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 340 (1996).
  25. Невдах В.В. *Квантовая электроника*, **31**, 525 (2001).