

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ПЕРЕХОДА 10^00-00^01 МОЛЕКУЛЫ CO_2 ПО ИЗМЕРЕНИЯМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО CO_2 -ЛАЗЕРА

Невдах В. В.¹, Аришинов К. И.², Аришинов М. К.²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Институт технической акустики НАНБ, Витебск, Республика Беларусь

С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого CO_2 -лазера измерены насыщенные коэффициенты поглощения в чистом углекислом газе при давлениях 1 и 100 Тор и в бинарных смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2$ и $\text{CO}_2:\text{He}$ при давлении 100 Тор в диапазоне температур 296–700К. Для линии поглощения $R22$ перехода 10^00-00^01 молекулы CO_2 определены коэффициент Эйнштейна $A_{\text{мн}}$, коэффициент столкновительного самоуширения, относительные коэффициенты столкновительного уширения буферными газами N_2 и He и их температурные зависимости.

Молекулы углекислого газа участвуют в ряде глобальных процессов, протекающих на Земле, таких как фотосинтез, сгорание органических топлив, растворение и выделение водами мирового океана, гниение органических веществ, дыхание растений. Углекислый газ, входящий в состав атмосферы, участвует также в процессах ее теплового баланса и поэтому рассматривается как один из парниковых газов [1]. Считается, что рост содержания этого газа в атмосфере, вызванный хозяйственной деятельностью людей, приводит к увеличению доли теплового излучения Земли, поглощаемого атмосферой и тем самым ведет к глобальному потеплению. Кроме того, молекулы CO_2 являются рабочими молекулами CO_2 -лазеров – одного из самых распространенных и мощных типов технологических лазеров.

Использование оптических методов диагностики атмосферы и нагретых газообразных продуктов сжигания топлив с целью определения концентрации углекислого газа и его температуры, расчет характеристик CO_2 -лазеров требуют знания значений спектроскопических параметров для соответствующих линий молекулы CO_2 и их температурных зависимостей (см., например, [2–6]).

Поэтому молекула CO_2 уже длительное время является объектом разносторонних, в том числе и оптических исследований, направленных на определение этих параметров и, как отмечалось в работе [7], уже стала «тестовой»

молекулой. Однако несмотря на интенсивные исследования, ряд задач, связанных с определением параметров линий различных переходов молекулы CO_2 , все еще остаются нерешенными.

Зависимость столкновительной ширины спектральной линии молекулы CO_2 $\Delta\nu_L$ (FWHM – полная ширина на половине максимума) от температуры газа T обычно представляется в виде [2] :

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

где $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ – столкновительная ширина линии за счет столкновения молекул CO_2 между собой при давлении 1 Тор и температуре 300К или коэффициент столкновительного самоуширения для молекулы CO_2 , P_C – давление углекислого газа.

Показатель степени n в (1) зависит от механизма взаимодействия сталкивающихся молекул и для линий перехода 10^00-00^01 имеет величины, которые по разным литературным данным находятся в диапазоне от 0,5 до 1 [2, 3, 8, 9].

При расчетах столкновительных ширин линий генерации CO_2 -лазеров на основных лазерных переходах $00^01-[10^00,02^00]_{\text{лп}}$ для газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$:

Не при давлении P_Σ обычно используют формулу [6, 10]:

$$\Delta\nu_L = \gamma_{CO_2-CO_2} (\xi_{CO_2} + b_{N_2} \xi_{N_2} + b_{He} \xi_{He}) P_{\Sigma} \sqrt{300/T}, \quad (2)$$

где ξ_{CO_2} , ξ_{N_2} , ξ_{He} – доли CO_2 , N_2 и He в смеси,
 $b_{N_2} = \gamma_{CO_2-N_2} / \gamma_{CO_2-CO_2} = 0,73$,
 $b_{He} = \gamma_{CO_2-He} / \gamma_{CO_2-CO_2} = 0,64$ – относительные коэффициенты столкновительного уширения линий молекул CO_2 молекулами и атомами буферных газов N_2 и He соответственно. Отсутствие температурных зависимостей у используемых в (2) коэффициентов b_{N_2} и b_{He} противоречит существующим представлениям о механизмах столкновительного уширения спектральных линий [3, 11].

Величину $\Delta\nu_L$ обычно определяют или непосредственно измеряя форму контура 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 CO_2 с высокой точностью является более сложной экспериментальной задачей, чем измерение КП на одной частоте. Для линий переходов $[10^0 0,02^0]_{L,II} - 00^0 1$ задача облегчается тем, что в качестве зондирующего излучения можно использовать резонансное излучение стабилизированного по частоте CO_2 -лазера, перестраиваемого по линиям этих же переходов.

В настоящей работе определены параметры столкновительно-уширенной линии поглощения $R22$ перехода $10^0 0 - 00^0 1$ молекулы CO_2 из экспериментально измеренных с помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого CO_2 -лазера величин КП в чистом CO_2 и в смесях с буферными газами N_2 и He при различных температурах и давлениях, соответствующих доплеровскому и лоренцевскому контурам линий поглощения.

Методика измерений

Выражение для КП на центральной частоте ν_0 любой линии перехода $10^0 0 - 00^0 1$ молекулы CO_2 , резонансной частоте генерации стабилизированного по максимуму контура усиления перестраиваемого CO_2 -лазера в общем случае может быть представлено в виде [12]:

$$\alpha_{nm}(\nu_0) = N_C A_{mn} \frac{c^2}{8\pi\nu_0^2} g_m Q_V^{-1} Q_{Rm}^{-1} \left(e^{-\frac{E_n}{kT}} - e^{-\frac{E_m}{kT}} \right) F(0), \quad (3)$$

где N_C – плотность молекул CO_2 ; A_{mn} – вероятность спонтанного излучения;
 $Q_{Rm} = kT/2hcB_m$ – вращательная и
 $Q_V = [1 - \exp(-\frac{1997K}{T})]^{-1} [1 - \exp(-\frac{960K}{T})]^{-2} \times$
 $\times [1 - \exp(-\frac{3380K}{T})]^{-1}$ – колебательная статистические суммы молекулы CO_2 соответственно; $E_n = E_{100} + B_n J(J+1)$ и $E_m = E_{001} + B_m C_1(J)$ – энергии рассматриваемых уровней; $E_{100} = 1388,3 \text{ см}^{-1}$ и $E_{001} = 2349,3 \text{ см}^{-1}$; J – вращательное квантовое число нижнего уровня $10^0 0$; $B_n = 0,39018783 \text{ см}^{-1}$ и $B_m = 0,8714044 \text{ см}^{-1}$ – вращательные постоянные рассматриваемых уровней; $g_m = 2J-1$ – вырождение уровня m и $C_1 = J(J-1)$ – для линий P -ветви; $g_m = 2J+3$ и $C_1 = (J+1)(J+2)$ – для линий R -ветви; $F(0)$ – форм-фактор в центре линии поглощения.

Известно, что линия поглощения молекул CO_2 имеет столкновительно-уширенный контур с шириной $\Delta\nu_L$ при давлениях углекислого газа $P_C > 50 \text{ Тор}$ (см., например, [6]).

Форм-фактор в центре такой линии дается выражением:

$$F_L(0) = 2/\pi \Delta\nu_L = 2/\pi \gamma_{CO_2-CO_2} P_C. \quad (4)$$

В рассматриваемых условиях молекулы CO_2 подчиняются законам идеального газа, в том числе выполняется условие $P_C = N_C kT$, и из выражений (3) и (4) следует, что в случае столкновительно-уширенного контура линии поглощения величина КП не зависит от давления газа P_C .

Также видно, что величина КП при фиксированной температуре определяется коэффициентом $\gamma_{CO_2-CO_2}$ и другими спектроскопическими параметрами молекулы CO_2 . Если эти параметры известны, то, измерив КП α_L , из выражений (3) и (4) можно определить величину $\gamma_{CO_2-CO_2}$.

Проведя такие измерения КП при различных температурах, можно получить температурную зависимость $\gamma_{CO_2-CO_2}(T)$.

В настоящей работе измерения КП проводились на линии поглощения R22 перехода $10^0 0 - 00^0 1$ молекулы CO_2 . Выбор линии R22 обусловлен тем, что на результаты измерений КП на центральной частоте этой линии другие, близкие по частоте линии поглощения вышележащих переходов молекулы CO_2 , оказывают минимальное влияние. По проведенным оценкам при $T=700^\circ\text{C}$ и $p=1$ атм вклад в измеряемый КП, который могут давать линии поглощения вышележащих переходов молекулы CO_2 , составляет $\sim 0,2\%$ и, следовательно, при рассматриваемых в работе давлениях и температурах этот вклад еще меньше и им можно пренебречь.

Следует отметить, что почти все параметры, входящие в выражение (3) для молекулы CO_2 , измерены с достаточно высокой точностью.

Исключение составляют вероятности спонтанного излучения A_{mn} , в значениях которых в литературе существует достаточно большая неопределенность (см., например, [2, 13–15]). В силу вышеупомянутого для повышения точности определения коэффициента $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ величину A_{mn} нужно или измерить с высокой точностью, или предложить методику, не использующую A_{mn} .

Также известно, что при малых давлениях углекислого газа ($P_C \leq 1$ Тор) линия поглощения имеет доплеровский контур, а выражение для форм-фактора в центре такой линии имеет вид:

$$F_D(0) = \frac{1}{v_0} \sqrt{\frac{Mc^2}{2\pi kT}}, \quad (5)$$

где M – масса молекулы CO_2 . Из (3) и (5) следует, что величина коэффициента Эйнштейна для спонтанного излучения A_{mn} может быть определена, если с достаточно высокой точностью измерить КП α_D в чистом CO_2 при фиксированной температуре и давлении, обеспечивающем доплеровский контур линии поглощения.

Влияние существующих неопределенностей в величинах коэффициентов Эйнштейна и других спектроскопических параметров линий, входящих в выражение (3), на определяемый параметр $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ может быть уменьшено, если его определять не по результату измерения α_L из выражения (3), а по отношению α_D/α_L из выражения:

$$\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} = \frac{2\alpha_D}{\pi\alpha_L P_D F_D(0)}, \quad (6)$$

где P_D – давление углекислого газа, при котором линия поглощения имеет доплеровский контур.

Относительные коэффициенты столкновительного уширения линии b_M буферными газами N_2 и He b_{N_2} и b_{He} в настоящей работе определялись по результатам измерений КП в чистом CO_2 α_{CO_2} и в бинарных смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2$, $\text{CO}_2:\text{He}$ $\alpha_{\text{CO}_2:M}$ с соотношениями компонент $P_{\text{CO}_2} : P_M = 1 : Y$ при давлениях P_C и P_Σ , обеспечивающих лоренцевские контура линий поглощения, например, при $P_C=P_\Sigma=100$ Тор из выражения

$$\alpha_{\text{CO}_2} / \alpha_{\text{CO}_2-M} = 1 + Yb_M. \quad (7)$$

Экспериментальная установка, результаты измерений и их обсуждение

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 $00^0 1 - [10^0 0, 02^0 0]_{\text{I,II}}$, была подробно описана в работах [16, 17]. Долговременная нестабильность частоты генерации лазера не превышала величины $\pm 0,5$ МГц относительно центральной частоты линии генерации, позволяя при реализуемых экспериментально ширинах линий поглощения больше 50 МГц с достаточной точностью считать, что измерения КП проводились на центральных частотах резонансных линий поглощения.

Погрешность определения давления газа в области малых давлений ($p < 2$ Тор) составляла $\Delta p = \pm 0,07$ Тор. Система термостатирования измерительной кюветы позволяла поддерживать температуру газа с точностью $\Delta T = \pm 0,4^\circ$ (диапазон $293\text{K} \leq T \leq 420\text{K}$) и $\Delta T = \pm 0,9^\circ$ (диапазон $470\text{K} \leq T \leq 700\text{K}$). Погрешность измерения КП не превышала $\Delta\alpha = \pm 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ (диапазон $293\text{K} \leq T \leq 420\text{K}$) и $\Delta\alpha = \pm 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ (диапазон $470\text{K} \leq T \leq 700\text{K}$).

На рисунке 1а представлены результаты измерений КП α_D при давлении CO_2 $P_C=1$ Тор в диапазоне температур от 296 до 700К. При $T=296\text{K}$ результаты измерений дали значение

$\alpha_D = (0.327 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Из выражений (3) и (5) получено, что такому КП соответствует величина коэффициента Эйнштейна $A_{mn} = 0.192 \text{ с}^{-1}$.

Результаты измерений КП α_L при давлении углекислого газа $P_C = 100 \text{ Тор}$ в том же диапазоне температур 296–700 К представлены на рисунке 1б.

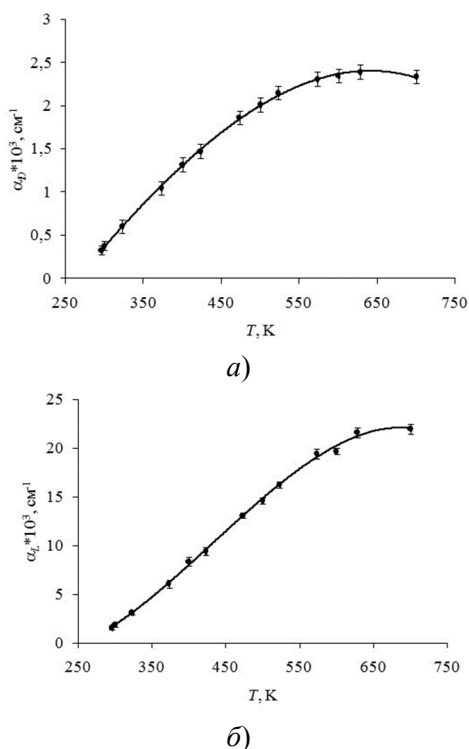


Рисунок 1 – Температурные зависимости коэффициента поглощения в чистом CO_2 при давлении 1 Тор (а) и 100 Тор (б) на центральной частоте линии 10R22

Определенные по измеренным значениям α_L из выражений (3) и (4) коэффициенты столкновительного самоуширения для молекулы CO_2 $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ представлены треугольниками на рисунке 2. Методом наименьших квадратов получено, что через эти экспериментальные точки можно провести зависимость типа (1) с показателем степени $n=0,9$ (см. пунктирная кривая 1).

На этом же рисунке 2 кружками представлены значения коэффициента столкновительного самоуширения для молекулы CO_2 $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$, полученные другим способом – по формуле (6) из отношения α_D/α_L . Следует отметить, что значения $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$, полученные двумя способами, практически совпадают только при температуре $T=296 \text{ К}$.

При всех других температурах наблюдается различие. Соответственно, температурная зависимость $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}(T)$, построенная с помощью метода наименьших квадратов по этим экспериментальным точкам (см. сплошную кривую), не совпадает с первой зависимостью.

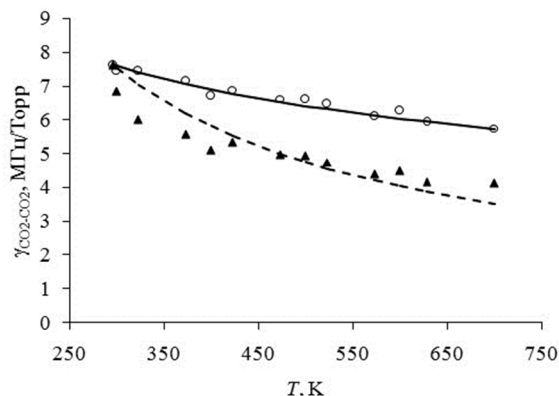


Рисунок 2 – Температурные зависимости коэффициента столкновительного самоуширения линии R22, полученные двумя способами: $\blacktriangle$ – по измеренному α_L из формул (3) и (4); $\circ$ – по измеренному отношению α_D/α_L из формулы (6)

Для этой зависимости показатель степени из выражения (1) имеет значение $n=0.35$. Это значительно меньший показатель, чем полученный для пунктирной кривой. Ясно, что получение двух различных температурных зависимостей для одного и того же параметра $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ связано с различием в методиках, использовавшихся для определения этого параметра.

В первой методике значение параметра $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ для каждой температуры определялось из формул (3) и (4) по измеренному КП α_L , используя табличные значения остальных спектроскопических параметров линии поглощения, входящих в эти формулы.

Во второй методике параметр $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ определялся по формуле (6), т.е. по отношению двух измеренных КП α_D/α_L . При этом исключается использование ряда других спектроскопических параметров линии поглощения, использовавшихся в первой методике, но используются измеренные значения α_D . Для того чтобы объяснить причину получения двух различных зависимостей $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}(T)$, нужны дополнительные исследования.

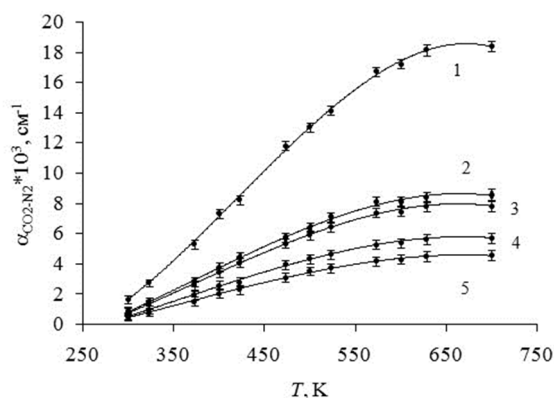


Рисунок 3 – Температурные зависимости коэффициента поглощения на линии 10R22 в газовых смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:Y$ при давлении 100 Тор: 1) $Y=0.19$, 2) $Y=1.5$, 3) $Y=1.78$, 4) $Y=3$, 5) $Y=4$

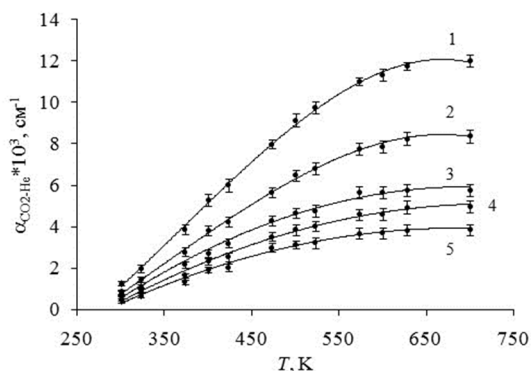


Рисунок 4 – Температурные зависимости коэффициента поглощения на линии 10R22 в газовых смесях $\text{CO}_2:\text{He}=1:Y$ при давлении 100 Тор: 1) $Y=1$, 2) $Y=2$, 3) $Y=3$, 4) $Y=4$, 5) $Y=5$

Кроме КП в чистом CO_2 α_{CO_2} при $P_c = 100$ Тор, были измерены КП в бинарных смесях $\text{CO}_2:\text{N}_2$, $\text{CO}_2:\text{He}$ $\alpha_{\text{CO}_2:M}$ с различными соотношениями компонент $P_{\text{CO}_2} : P_M = 1:Y$ в температурном диапазоне 296–700K при давлении смеси $P_2=100$ Тор (см. рисунки 3 и 4). Для каждой температуры строилась зависимость отношения КП $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-M}$ от величины Y в соответствии с формулой (7) и по наклону прямых определялись коэффициенты b_{N_2} и b_{He} . На рисунке 5 а представлены примеры таких зависимостей для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ при двух температурах 320 и 700K. Из них получено, что при $T=320\text{K}$ $b_{\text{N}_2}=0,74\pm0,03$, а при $T=700\text{K}$ $b_{\text{N}_2}=0,995\pm0,03$.

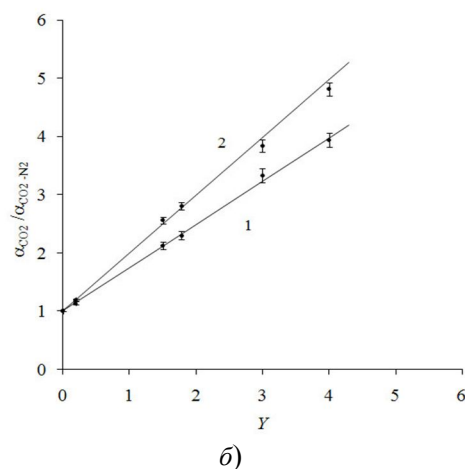
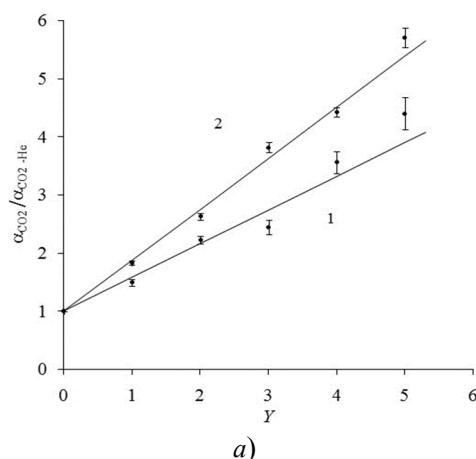


Рисунок 5 – Зависимости отношения коэффициентов поглощения $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_M$ от соотношения концентраций компонент бинарной смеси $Y = M/\text{CO}_2$ для $M=\text{N}_2$ а) и $M=\text{He}$ б), при температурах 300K – 1 и 700K – 2

Аналогичные зависимости для смеси $\text{CO}_2:\text{He}$ представлены на рисунке 5 б. Получено, что при $T=320\text{K}$ $b_{\text{He}}=0,603\pm0,04$, а при $T=700\text{K}$ $b_{\text{He}}=0,876\pm0,03$.

Таким образом, экспериментальные данные, представленные на рисунках 5-а,б, показывают, что в исследованном диапазоне температур отношения КП $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-\text{N}_2}$ и $\alpha_{\text{CO}_2}/\alpha_{\text{CO}_2-\text{He}}$ и, следовательно, коэффициенты b_{N_2} и b_{He} увеличиваются с ростом температуры.

Характер изменения коэффициентов b_{N_2} и b_{He} с изменением температуры иллюстрирует рисунок 6. Видно, что до температуры $\sim 550\text{K}$

коэффициент b_{N_2} остаётся практически постоянным, что согласуется с результатами работы [18].

Для коэффициента b_{He} небольшая зависимость наблюдается. Однако при дальнейшем увеличении температуры газа наши измерения однозначно показывают зависимость обоих коэффициентов b_{N_2} и b_{He} от температуры. Это означает, что широко используемая формула (2) при таких температурах оказывается некорректной.

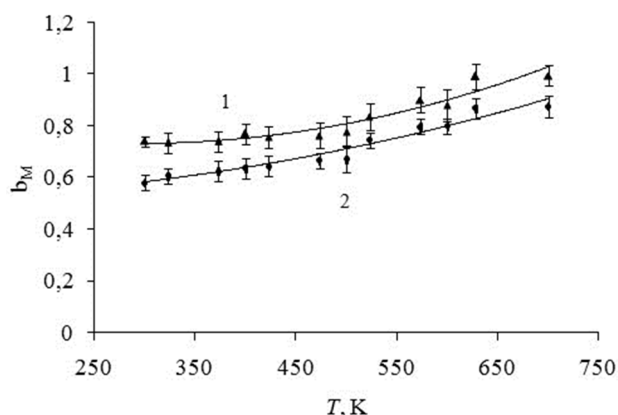


Рисунок 6 – Температурные зависимости коэффициентов столкновительного уширения линии поглощения 10R22 молекулы CO_2 молекулами N_2 – 1 и атомами He – 2

В соответствии с физическим смыслом формулы (2), каждое слагаемое в правильной формуле должно иметь свою зависимость от температуры точно так же, как свои температурные зависимости имеют константы скорости столкновительной релаксации верхнего лазерного уровня 00^0_1 молекулы CO_2 в чистом CO_2 и в бинарных смесях $CO_2:N_2$ и $CO_2:He$ (см., например, [19]).

Заключение

С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого CO_2 -лазера измерены ненасыщенные КП в чистом углекислом газе при давлениях 1 и 100 Тор и в бинарных смесях $CO_2:N_2$ и $CO_2:He$ при давлении 100 Тор в диапазоне температур 296–700К.

Для линии поглощения R22 перехода $10^0_0-00^0_1$ молекулы CO_2 определены коэффициент Эйнштейна A_{mn} , коэффициент столкновитель-

ного самоуширения $\gamma_{CO_2-CO_2}$, относительные коэффициенты столкновительного уширения b_{N_2} и b_{He} буферными газами N_2 и He и их температурные зависимости.

Установлено, что величина показателя степени температуры зависит от методики определения коэффициента столкновительного самоуширения, а относительные коэффициенты столкновительного уширения буферными газами N_2 и He являются функциями температуры газа.

Список цитируемых источников

1. Смирнов, Б. М. // УФН. – 1978. – Т. 126. – В. 3. – С. 527.
2. Ачасов, О. В. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах. / О. В. Ачасов [и др.] – Минск : Наука и техника, 1985. – 208 с.
3. Стариков, В. И. Столкновительное уширение спектральных линий поглощения молекул атмосферных газов / В. И. Стариков, Н. Н. Лаврентьева; под общ. ред. К. М. Фирсова. – Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006. – 308 с.
4. Артемьев В. В., Аршинов К. И., Лешенюк Н. С., Невдах В. В. // Опт. и спектр. – 2004. – Т. 96. – № 6. – С. 1004.
5. Аршинов К. И., Аршинов М. К., Невдах В. В. и др. // ЖПС. – 2007. – Т. 74. – № 6. – С. 810.
6. Витteman, В. CO_2 -лазер / В. Витteman, пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 360 с.
7. Андреев С. Н., Очкин В. Н., Савинов С. Ю. // Квант. электрон. – 2002. – Т. 32. – № 7. – С. 647.
8. Rosenmann L., Perrin M. Y., Taine J. // J. Chem. Phys. – 1988. – V. 88. – № 5. – Р. 2995.
9. Аршинов К. И., Лешенюк Н. С. // Квант. электр. 1997. Т. 24. № 7. С.517.
10. Abrams R. L. // Appl.Phys.Lett. – 1974. – V. 25. – № 10. – Р. 609.
11. Чен Ш., Такео М. // УФН. – 1958. – Т. 66. – В. 3. – С. 391.
12. Ельяшевич, М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М. А. Ельяшевич – М. : ФМЛ, 1962. – 892 с.
13. Бирюков А. С., Волков А. Ю., Кудрявцев Е. М., Сериков Р. И. // Квант. электрон. 1976. – Т. 3 – № 8. – С. 1748.
14. Невдах В. В. // Квант. Электрон. – 1984. – Т.11. – № 8. – С. 1622.
15. Аршинов К. И., Лешенюк Н. С., Невдах В. В. // Квант. электрон. – 1998. – Т. 25. – № 8. – С. 679.

16. Аршинов К. И., Каблуков Н. Г., Тихонов Ф. В. // ПТЭ. – 1996. – № 1. – С. 103.
17. Аршинов К. И., Каблуков Н. Г., Лешенюк Н. С. // ПТЭ. – 1991. – № 1. – С. 237.

18. Robinson A. M., Weiss J. S. // Can. J. Phys. – 1982. – V. 60. – P. 1656.
19. Невдах В. В., Орлов Л. Н., Лешенюк Н. С. // ЖПС. – 2003. – Т. 70. – № 2. – С. 246.

Nevdakh V. V., Arshinov K. I., Arshinov M. K.

Determination of absorption line parameters for CO₂ 10⁰0–00⁰1 transition from absorption coefficient measurements by tunable CO₂ laser

The unsaturated absorption coefficients in pure CO₂ at the pressures 1 and 100 Torr and in CO₂:N₂ and CO₂:He binary gas mixtures at the pressure 100 Torr are measured in the 296-700K temperature range by a frequency-stabilized tunable CO₂ laser. The coefficient of Einstein A_{mn} , CO₂ self-broadening coefficient, the relative optical broadening coefficients in CO₂ due to the presence of foreign gases N₂ and He and its temperature dependences are obtained for the R22 line of CO₂ 10⁰0-00⁰1 transition.

Поступила в редакцию 21.06.2010.