

СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 53.082; 535.343

Многочастотная лазерная диагностика колебательно-неравновесной газовой среды, содержащей молекулы CO₂

К.И. Аршинов¹, О.Н. Крапивная¹, В.В. Невдах^{2*}

¹Институт технической акустики НАН Беларуси
210023, г. Витебск, пр. Людникова, 13, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 13, Беларусь

Поступила в редакцию 8.09.2015 г.

Представлена методика многочастотной диагностики колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы CO₂, в которой использованы данные измерений с помощью перестраиваемого CO₂-лазера ненасыщенных коэффициентов усиления на линиях переходов 00⁰1–[10⁰0, 02⁰0]_{I, II} и 00⁰2–[10⁰1, 02⁰1]_{I, II}. Приводятся результаты исследования влияния погрешностей измерений коэффициентов усиления и количества зондирующих линий на погрешности определения населенностей колебательных уровней и поступательной температуры газовой смеси.

Ключевые слова: колебательно-неравновесная газовая среда, молекулы CO₂, многочастотная диагностика, населенности колебательных уровней, поступательная температура газа; vibrational nonequilibrium gas media, CO₂ molecules, multifrequency probing, level population, gas temperature.

Введение

Колебательно-неравновесные газовые среды – это мономолекулярные газы или их смеси, находящиеся в условиях нарушения закона равномерного распределения энергии по поступательным и внутренним колебательным и вращательным степеням свободы. В таких условиях в неравновесных средах осуществляется энергообмен между разными степенями свободы, который оказывает влияние на протекающие в них физические процессы, в частности на параметры возникновения неустойчивостей. Вследствие этого неравновесные газовые среды обладают рядом свойств, отличающихся от соответствующих свойств равновесных сред, и поэтому такие среды являются объектами разноплановых исследований (см., например, [1, 2]). К колебательно-неравновесным газовым средам, содержащим молекулы CO₂, относятся активные среды электроразрядных и газодинамических CO₂-лазеров [3–6]. Такие неравновесные газовые смеси образуются также в верхних слоях атмосферы Земли и других планет, при распространении ударных волн в атмосфере, при интенсивном горении углеводородных топлив [7, 8].

Диагностика колебательно-неравновесных газовых сред осуществляется различными методами, имеющими разные возможности и условия применения

(см., например, [9, 10]). Метод лазерного спектрографа с использованием стабилизированного по частоте перестраиваемого CO₂-лазера в качестве источника зондирующего излучения представляется наиболее подходящим и удобным в реализации диагностики как равновесных, так и неравновесных газовых сред, содержащих молекулы CO₂ (см., например, [11–14]).

В настоящей статье представлена методика многочастотного зондирования колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы CO₂. Методика основана на использовании данных измерений перестраиваемым CO₂-лазером ненасыщенных коэффициентов усиления на линиях переходов 00⁰1–[10⁰0, 02⁰0]_{I, II} и 00⁰2–[10⁰1, 02⁰1]_{I, II} молекул CO₂. Приводятся также результаты исследования влияния погрешностей измерений коэффициентов усиления и количества зондирующих линий на погрешности определения населенностей используемых колебательных уровней и поступательной температуры газовой смеси.

Методика диагностики

Выражение для ненасыщенного коэффициента усиления (КУ) в центре линии переходов 00⁰1–[10⁰0, 02⁰0]_{I, II} или 00⁰2–[10⁰1, 02⁰1]_{I, II} молекул CO₂ в колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы углекислого газа, может быть записано в виде [11]:

$$K_{1i,2i} = \frac{\lambda_{01i,2i}^2}{8\pi} A_{1i,2i} C_{1i,2i} \frac{2hcB_m}{kT} \left\{ N_m \exp \left[-C_{1i,2i}'' \frac{hcB_m}{kT} \right] - \right.$$

* Константин Иванович Аршинов (itaaki@yandex.ru); Ольга Николаевна Крапивная; Владимир Владимирович Невдах (v.v.nev@bk.ru).

$$-N_{n1,n2} \frac{B_{n1,n2}}{B_m} \exp \left[-J_{li,2i} (J_{li,2i} + 1) \frac{hcB_{n1,n2}}{kT} \right] \Big\} F_{li,2i}, \quad (1)$$

где индекс 1 относится к переходу 00^01-10^00 или 00^02-10^01 , индекс 2 – к переходу 00^01-02^00 или 00^02-02^01 , m – к верхнему лазерному уровню, n – к нижнему; $\lambda_{0li,2i}$ – длина волны в центре линии [15]; $A_{li,2i}$ – коэффициент Эйнштейна [15]; $F_{li,2i}$ – форм-фактор в центре i -й линии; $J_{li,2i}$ – вращательное квантовое число; $C'_{li,2i} = 2J_{li,2i} - 1$, $C''_{li,2i} = J_{li,2i}(J_{li,2i} - 1)$ для линий P -ветвей; $C_{li,2i} = 2J_{li,2i} + 3$, $C''_{li,2i} = (J_{li,2i} + 1)(J_{li,2i} + 2)$ для линий R -ветвей; $B_{001} = 0,3871 \text{ см}^{-1}$, $B_{100} = 0,3902 \text{ см}^{-1}$, $B_{020} = 0,3905 \text{ см}^{-1}$ – вращательные постоянные [16]; c – скорость света; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

Давление неравновесных газовых сред может лежать в диапазоне от единиц торр до атмосферного, и вклад эффекта Доплера и процессов столкновений в уширение спектральных линий может быть различным для разных давлений в этом диапазоне. Наиболее оптимальным представляется использование выражения для формфактора в центре линии смешанного или фойгтовского контура, учитывающего вклады обоих эффектов. Выражение для формфактора в центре фойгтовского контура $F_{li,2i}$ имеет следующий вид [17]:

$$F_{li,2i} = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \Delta v_{Dli,2i}} \left\{ \frac{a}{x_{li,2i} + [(bx_{li,2i})^q + \pi]^{1/2}} \right\}, \quad (2)$$

где $x_{li,2i} = (\Delta v_{Li,2i} / \Delta v_{Dli,2i}) (\ln 2)^{1/2}$, $\Delta v_{Li,2i} = \gamma_{li,2i} (\xi_{\text{CO}_2} + C_{\text{N}_2} \xi_{\text{N}_2} + C_{\text{HeI}} \xi_{\text{He}}) p_{\Sigma} (300/T)^{1/2}$ – столкновительная (лоренцевская) ширина линии [18], C_{N_2} , C_{HeI} – относительные коэффициенты столкновительного уширения i -й линии молекулами N_2 и атомами He [19], $\gamma_{li,2i}$ – коэффициент столкновительного уширения i -й линии [15], p_{Σ} – суммарное давление газа, ξ_{CO_2} , ξ_{N_2} , ξ_{He} – доли CO_2 , N_2 , He в газовой смеси, T – поступательная температура газа; $\Delta v_{Dli,2i} = (v_{0li,2i}/c) (kT \ln 4 / M_{\text{CO}_2})^{1/2}$ – доплеровская ширина линии, $v_{0li,2i}$ – центральная частота i -й линии [15], M_{CO_2} – масса молекулы CO_2 ; $a = \pi^{1/2}/2$; $b = (\pi - 2)/2$; $q = 2$.

Если КУ для колебательно-неравновесной среды измерены, то в выражении (1) неизвестными величинами остаются температура газа T и населенности колебательных уровней N_m и N_{n1} , N_{n2} . Связь между искомыми параметрами $\{N_{n1}, N_{n2}, N_m, T\}$ и результатами измерений КУ $\{k_{1i}, k_{2i}\}$ на линиях обоих переходов определяется избыточной системой уравнений

$$\begin{cases} k_{1i} = K_{1i}(N_{n1}, N_m, T), \\ k_{2i} = K_{2i}(N_{n2}, N_m, T), \end{cases} \quad (3)$$

где k_{1i} и k_{2i} – результаты i -го измерения КУ на линиях обоих переходов. Отметим различие между диагностикой колебательно-равновесной и колебательно-неравновесной газовыми смесями, содержащими молекулы CO_2 . В первом случае решается обрат-

ная задача, когда на основании измеренного спектрального распределения коэффициентов поглощения лазерного излучения одновременно определяются два искомого параметра – температура газовой смеси T и парциальное давление CO_2 p_{CO_2} . Во втором случае на основании измеренных спектральных распределений коэффициентов усиления лазерного излучения одновременно определяются четыре искомого параметра – температура газовой смеси T , населенности верхнего N_m и двух нижних колебательных уровней N_{n1} , N_{n2} рассматриваемых переходов.

Система уравнений (3) может быть решена методом наименьших квадратов, минимизируя функционал

$$Z = \sum_{i=1}^S \omega_{1i} (k_{1i} - K_{1i})^2 + \sum_{i=1}^S \omega_{2i} (k_{2i} - K_{2i})^2, \quad (4)$$

где ω_{1i} и ω_{2i} – весовые коэффициенты.

Для любой заданной температуры T условиям $\frac{\partial Z}{\partial N_{n1}} = 0$, $\frac{\partial Z}{\partial N_{n2}} = 0$, $\frac{\partial Z}{\partial N_m} = 0$ соответствует система линейных уравнений

$$\begin{cases} -N_{n1}H_1 + N_mH_2 = H_3, \\ -N_{n2}H_4 + N_mH_5 = H_6, \\ -N_{n1}H_7 - N_{n2}H_8 + N_mH_9 = H_{10}, \end{cases} \quad (5)$$

где коэффициенты $H_1 \div H_{10}$ представляются через параметры, входящие в выражения (1) и (2), и из-за их громоздкости не приводятся.

Алгоритм расчета состоит в том, что при некоторой минимальной температуре T_{\min} решается система уравнений (5) и на основе полученных значений населенностей уровней (N_{n1} , N_{n2} , N_m) вычисляется функционал Z (4), минимальный для данной температуры. Далее температура T варьируется в задаваемом температурном диапазоне $T_{\min} \div T_{\max}$ и для этого диапазона определяется минимальный функционал Z . Для первой итерации весовые коэффициенты принимаются равными единице, т.е. $\omega_{1i}^1 = 1$ и $\omega_{2i}^1 = 1$, а для $j + 1$ -го шага [20]:

$$\begin{aligned} \omega_{1i}^{j+1} &= \frac{1}{[k_{1i} - K_{1i}(N_{n1}^j, N_m^j, T^j)]^2}, \\ \omega_{2i}^{j+1} &= \frac{1}{[k_{2i} - K_{2i}(N_{n2}^j, N_m^j, T^j)]^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Использование весовых коэффициентов позволяет снизить влияние измеренных с большой погрешностью КУ на точность получаемого результата.

Результаты расчетов

Для анализа возможностей предлагаемой методики многочастотного зондирования была использована модель колебательно-неравновесной газовой

смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 5:10:85$ при общем давлении 80 торр. Для этой смеси задавалось произвольное значение поступательной температуры $T = 360$ К и три набора населенностей колебательных уровней $00^0_1 N_m = (7,82 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}; 1,6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}; 2,04 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3})$ и $10^0_0 N_{n1} = 1,7 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}, 02^0_0 N_{n2} = 2,11 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, соответствующих различной степени колебательно-неравновесия в смеси (таблица). Расчет КУ производился на основании выражений (1) и (2). За счет наложения гауссова шума на рассчитанные КУ с помощью функции `normrnd`, реализованной в математическом пакете `MatlabR12`, формировались «экспериментальные» КУ $\{k_{1i}, k_{2i}\}$. Уровень шума определялся в процентах от минимального КУ в рассматриваемом спектральном диапазоне ($J = 6 \div 34$) и был принят равным 3%, что приблизительно соответствовало среднеквадратическому отклонению (СКО) $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$.

Расчет СКО искомых параметров $\sigma_{N_{n1}}, \sigma_{N_{n2}}, \sigma_{N_m}, \sigma_T$ производился путем расчета ковариационной матрицы [20, 21]. В нашем случае ковариационная матрица представляет собой матрицу 4×4 с диагональными элементами $\sigma_{N_{n1}}^2, \sigma_{N_{n2}}^2, \sigma_{N_m}^2, \sigma_T^2$. В общем случае связь между ковариационными матрицами прямо $\{k_{1i}, k_{2i}\}$ и косвенно $\{N_{n1}, N_{n2}, N_m, T\}$ измеряемых величин может быть записана в виде

$$\text{COV} = (b^t \text{COV}_k b)^{-1}, \quad (7)$$

где b – матрица с элементами $b_{ij} = \frac{\partial K_{1i,2i}}{\partial y_j}$ ($j = 1 \div 4$;

$y_1 = N_{n1}, y_2 = N_{n2}, y_3 = N_m, y_4 = T$) в точке квази-решения; b^t – транспонированная матрица b . При прямых некоррелированных измерениях КУ $\{k_{1i}, k_{2i}\}$ с СКО σ_k выражение (7) принимает вид

$$\text{COV} = \sigma_k^2 (b^t b)^{-1}. \quad (8)$$

Выражение (8) связывает СКО искомых параметров $\sigma_{N_{n1}}, \sigma_{N_{n2}}, \sigma_{N_m}, \sigma_T$ с СКО входных данных – измеряемых КУ σ_k . На рис. 1 приведены зависимости СКО населенности верхнего уровня $00^0_1 \sigma_{N_m}$ от количества зондирующих линий n для $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$. Зависимости аналогичного вида получены для СКО населенности нижнего уровня $02^0_0 \sigma_{N_{n2}}$, для СКО населенности нижнего уровня $10^0_0 \sigma_{N_{n1}}$ и СКО температуры σ_T . Видно, что точность метода возрастает с ростом числа зондирующих линий, а также в случае одновременного использования зондирующих линий обоих колебательных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{\text{I, II}}$. Количество линий не менее 30 является оптимальным.

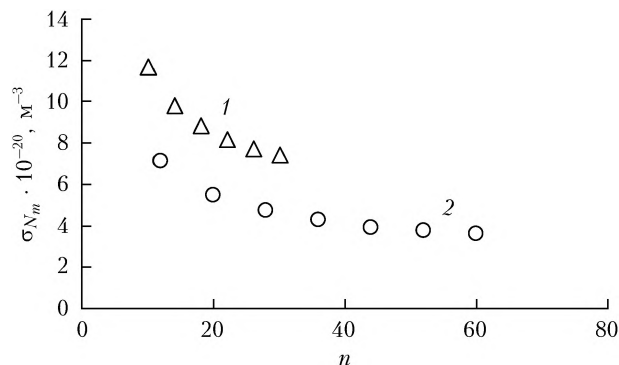


Рис. 1. Зависимости среднеквадратического отклонения населенности уровня $00^0_1 \sigma_{N_m}$ от числа зондируемых линий n для $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$ при использовании КУ на линиях P- и R-ветвей одного перехода $00^0_1-10^0_0$ (1) и обоих переходов $00^0_1-10^0_0$ и $00^0_1-02^0_0$ (2)

В таблице приведены относительные погрешности искомых параметров $\delta N_{n1}, \delta N_{n2}, \delta N_m$ и δT , которые были получены непосредственно при решении обратной задачи, когда населенности уровней и температура определялись по вышеописанной методике. В расчетах были использованы КУ 60 линий переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{\text{I, II}}$. Представленные в таблице результаты расчетов показывают, что точность метода остается практически неизменной в рассмотренном диапазоне неравновесных населенностей колебательных уровней $00^0_1, 10^0_0$ и 02^0_0 .

Очевидно, что система уравнений (5), если она имеет решение, соответствует наличию глобального минимума функционала Z (4). Графическое построение функционала Z является простым и информативным способом обнаружения глобального минимума при анализе влияния различных условий эксперимента, например погрешности измерения коэффициентов усиления. Для визуализации Z был использован набор из 60 КУ для линий основных колебательных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{\text{I, II}}$ молекулы CO_2 . На рис. 2 представлены зависимости логарифма функционала $\lg(Z)$ от населенностей колебательных уровней $00^0_1 N_m$ и $10^0_0 N_{n1}$ при СКО измерения КУ $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$ для $N_m/N_{n1} = 10$ и $N_m/N_{n1} = 200$. Видно, что при инверсии, превышающей некоторое значение, глобальный минимум Z трансформируется в ложбину (рис. 2, б), и населенность нижнего колебательного уровня 10^0_0 молекулы CO_2 не может быть определена корректно. При рассмотрении зависимости логарифма функционала $\lg(Z)$ от населенностей колебательных уровней $00^0_1 N_m$ и $02^0_0 N_{n2}$ был получен аналогичный результат.

Относительные погрешности определения населенностей колебательных уровней $\delta N_{n1}, \delta N_{n2}, \delta N_m$ и температуры газовой смеси δT для разных степеней колебательной неравновесности и СКО КУ $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$

Параметр	$N_m = 7,82 \cdot 10^{21},$ $N_{n1} = 1,7 \cdot 10^{21},$ $N_{n2} = 2,11 \cdot 10^{21}, \text{ м}^{-3}$	$N_m = 1,6 \cdot 10^{22},$ $N_{n1} = 1,7 \cdot 10^{21},$ $N_{n2} = 2,11 \cdot 10^{21}, \text{ м}^{-3}$	$N_m = 2,04 \cdot 10^{22},$ $N_{n1} = 1,7 \cdot 10^{21},$ $N_{n2} = 2,11 \cdot 10^{21}, \text{ м}^{-3}$
	$\delta N_{n1}, \%$	3,50	7,5
$\delta N_{n2}, \%$	3,30	5,1	1,0
$\delta N_m, \%$	3,30	3,5	2,7
$\delta T, \%$	0,01	0,1	0,1

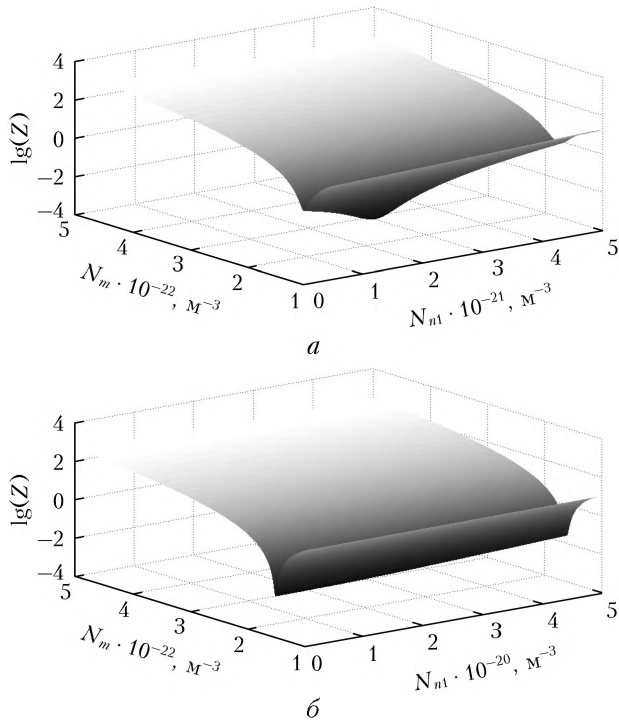


Рис. 2. Зависимости $\lg(Z)$ от населенностей колебательных уровней $00^0_1 N_m$ и $10^0_0 N_{n1}$ при СКО измерения КУ $\sigma_k = 0,02 \text{ м}^{-1}$: $N_m/N_{n1} = 10$ (а) и $N_m/N_{n1} = 200$ (б)

«Размывание» глобального минимума функционала Z происходит и при увеличении СКО измерений КУ (рис. 3).

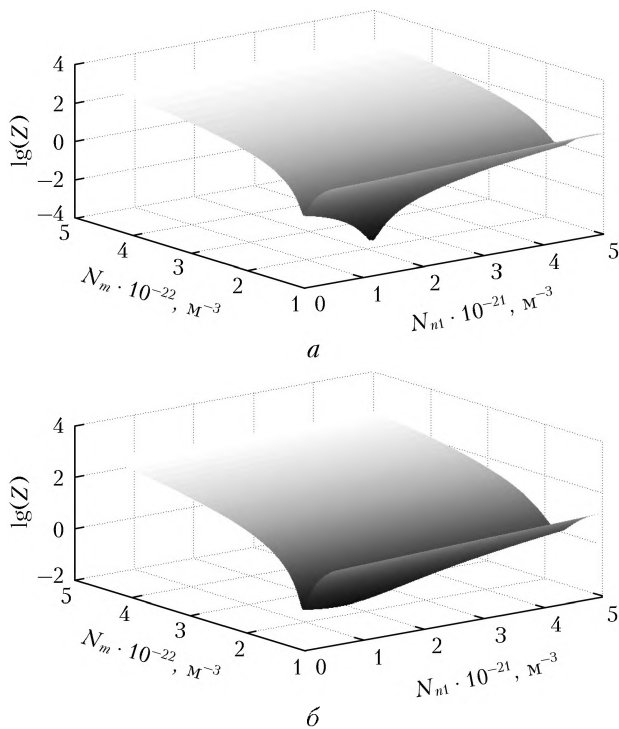


Рис. 3. Зависимости $\lg(Z)$ от населенностей колебательных уровней $00^0_1 N_m$ и $10^0_0 N_{n1}$ при количестве 60 зондирующих линий и СКО измерения КУ $\sigma_k = 0,007 \text{ м}^{-1}$ (а) и $\sigma_k = 0,07 \text{ м}^{-1}$ (б)

На основании данных, приведенных на рис. 1, можно сделать вывод, что результаты расчетов наиболее точны, когда используются КУ P - и R -ветвей обоих колебательных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ или $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$.

Таким образом, метод многочастотной лазерной диагностики колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы CO_2 , позволяет с высокой точностью определить не только населенность верхнего уровня N_m ($\delta N_m < 4\%$) и температуру T ($\delta T < 1\%$), но и населенности нижних уровней N_{n1} ($\delta N_{n1} < 8\%$), N_{n2} ($\delta N_{n2} < 6\%$) в случае одновременного использования КУ линий колебательных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ или $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$, когда точность входных данных (КУ) удовлетворяет условию $\sigma_k = 0,03k_{\min}$, где k_{\min} – минимальный измеренный КУ.

Разработанная методика многочастотной диагностики колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы CO_2 , была также применена для анализа реальных экспериментальных данных – результатов измерений ненасыщенных коэффициентов усиления в активной среде CO_2 -лазера с поперечным разрядом при давлении 80 торр на линиях P - и R -ветвей основных лазерных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ и переходов первой полосы секвенции $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$ [22]. Из представленных в [22] данных были исключены линии с измеренными аномальными КУ $10P(12)$, $10P(20)$, $9P(18)$, $9P(22)$, $9R(10)$, $9R(12)$, $9R(18)$, $9R(24)$ переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ и $10P(15)$, $10P(25)$, $10R(31)$, $9R(17)$ переходов $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$, а также линии $10P(14)$, $10P(18)$, $10P(28)$, $10P(34)$, $9P(10)$, $9R(14)$, $9R(30)$, $9R(32)$ переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$, которые перекрываются с линиями горячих переходов $11^1_0-01^1_1$, $03^1_0-01^1_1$ (см., например, [13]). Были определены поступательная температура активной среды и населенности лазерных колебательных уровней 00^0_1 , 10^0_0 , 02^0_0 , 00^0_2 , 10^0_1 , 02^0_1 :

$$T = (366,8 \pm 0,3) \text{ К}, N_{001} = (1,816 \pm 0,01) \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3},$$

$$N_{020} = (2,087 \pm 0,07) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3},$$

$$N_{100} = (1,817 \pm 0,06) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3},$$

$$T = (364,6 \pm 1,1) \text{ К}, N_{002} = (4,529 \pm 0,03) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3},$$

$$N_{021} = (3,359 \pm 0,04) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3},$$

$$N_{101} = (2,348 \pm 0,03) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Полученные результаты показывают, что используемое авторами работы [22] предположение о том, что в активной среде CO_2 -лазера с поперечным разрядом населенности нижних колебательных уровней намного меньше населенностей верхних колебательных уровней лазерных переходов, не соответствует реальности.

Заключение

Разработанная методика многочастотной лазерной диагностики колебательно-неравновесной газовой среды, содержащей молекулы CO_2 , основана на результатах измерения ненасыщенных коэффициентов

усиления на линиях переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ и $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$ молекул CO_2 и позволяет определять поступательную температуру среды и населенности соответствующих колебательных уровней. Проведен анализ возможностей предлагаемой методики на модели колебательно-неравновесной газовой смеси, и показано, что результаты диагностики наиболее точны, когда измерения коэффициентов усиления производятся не менее чем на 30 линиях P - и R -ветвей обоих колебательных переходов $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ или $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$. Показано, что если среднеквадратические отклонения измеряемых КУ соответствуют условию $\sigma_k = 0,03k_{\min}$, то методика позволяет определять населенность верхнего колебательного уровня N_m с относительной погрешностью $\delta N_m < 4\%$, нижнего уровня N_{n1} с $\delta N_{n1} < 8\%$, нижнего уровня N_{n2} с $\delta N_{n2} < 6\%$ и поступательную температуру T с $\delta T < 1\%$. Методика апробирована на результатах измерений коэффициентов усиления в активной среде реального CO_2 -лазера с поперечным разрядом.

1. Осипов А.И., Уваров А.В. Неравновесный газ: проблемы устойчивости // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 6. С. 639–650.
2. Осипов А.И., Уваров А.В. Физика неравновесного газа // Природа. 2001. № 10. С. 61–68.
3. Виттман В. CO_2 -лазер. М.: Мир, 1990. 360 с.
4. Андерсон Дж. Газодинамические лазеры: введение. М.: Мир, 1979. 202 с.
5. Химические лазеры / Под. ред. Р. Гросса и Дж. Бота. М.: Мир, 1980. 832 с.
6. Борейшо А.С. Мощные мобильные химические лазеры // Квант. электрон. 2005. Т. 35, № 5. С. 393–406.
7. Летохов В.С. Лазерный эффект в космосе // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172, № 12. С. 1468–1470.
8. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 347 с.
9. Ачасов О.И., Кудрявцев Н.Н., Новиков С.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах. Минск: Наука и техника, 1985. 208 с.
10. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
11. Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Расчет населенностей лазерных уровней CO_2 и колебательных температур по спектральному распределению коэффициента усиления // Квант. электрон. 1998. Т. 25, № 8. С. 679–682.

12. Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Многочастотная диагностика колебательно равновесной CO_2 -содержащей газовой смеси // Ж. прикл. спектроскопии. 2001. Т. 68, № 6. С. 723–728.
13. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В., Perrin M.Y., Soufiani A., Яснов В.В. Точность определения температуры и парциального давления CO_2 в составе газовых смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{NO}_2$ методом многочастотного лазерного зондирования с использованием перестраиваемого CO_2 -лазера // Ж. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 6. С. 810–815.
14. Аршинов К.И., Крапивная О.Н., Невдах В.В. Лазерная диагностика равновесной газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 387–391.
15. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brozen L.R., Campargue A., Chance K., Cohen E.A., Couderc T., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R.J., Li G., Long D.A., Lyulin O.M., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I., Wagner G. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50.
16. Bridges T.J., Chang T.Y. Accurate rotational constants of CO_2 from measurements of cw beats in bulk GaAs between CO_2 vibrational-rotational laser lines // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. P. 811–815.
17. Кудря В.П. Вычисление значения функции Фойгта в центре линии // Оптика и спектроскопия. 1983. Т. 55, вып. 6. С. 113–114.
18. Abrams R.L. Broadening coefficients for the $P(20)$ CO_2 laser transition // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25, N 10. P. 609–611.
19. Булашин М.О., Бульчев В.П., Ходос Э.Б. Определение параметров колебательно-вращательных линий в полосах 9,4 и 10,4 мкм CO_2 при разных температурах // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48, вып. 4. С. 732–737.
20. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
21. Лешенюк Н.С., Пашкевич В.В. Точностные характеристики диагностики активных сред CO_2 -лазеров по измерениям коэффициентов усиления // Ж. прикл. спектроскопии. 1987. Т. 46, № 4. С. 567–573.
22. Brimacombe R.K., Reid J. Measurements of anomalous gain coefficients in transversely excited CO_2 laser // IEEE J. Quant. Electron. 1983. V. 19, N 11. P. 1674–1679.

K.I. Arshinov, O.N. Krapivnaya, V.V. Nevdakh. Multifrequency laser diagnostics of vibrational non-equilibrium gas media containing CO_2 molecules.

The technique for the multifrequency laser diagnostics of a vibrational nonequilibrium gas media containing CO_2 molecules with the use of the unsaturated gains at the lines of the $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I, II}$ and $00^0_2-[10^0_1, 02^0_1]_{I, II}$ transitions is presented. The influences of accuracy of gain measurements and a number of sensed lines on the accuracy of the level population and temperature determination are studied.