

А.К. Коваль, В.Д. Миронов

## СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕР С УПРАВЛЯЕМЫМ СПЕКТРОМ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ ТРАССОВОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Статья посвящена исследованию метода управления спектром СО<sub>2</sub>-лазера, основанному на конкуренции колебательно-вращательных линий и зависимости автографа лазера от длины резонатора. Рассмотренный метод позволяет более полно использовать энергетические возможности активной среды. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование диапазона устойчивости автографа лазера и получено хорошее согласие результатов. Сообщается о конструкции лазера с управляемым спектром генерации (ЛУС) и его применении для атмосферной спектрометрии дифференциального поглощения.

Широкое применение СО<sub>2</sub>-лазеров в качестве источников излучения в трассовых и дистанционных лазерных газоанализаторах дифференциального поглощения (ЛГА ДП) определяется возможностью получения генерации в широком спектральном интервале (9,0–11,4 мкм с учетом изотопических модификаций молекулы СО<sub>2</sub>), совпадающем с окном прозрачности атмосферы, наличием резонансов поглощения с рядом практически важных газов-загрязнителей. В последнее время интерес к применению СО<sub>2</sub>-лазеров в газоанализе стимулируется появлением высокоэффективных нелинейных материалов, позволяющих синтезировать новые частоты, перекрывающие значительную часть средней ИК-области спектра [1].

В статье сообщается о разработке СО<sub>2</sub>-лазера с управляемым спектром генерации (ЛУС), позволяющим получать одно-, двух- и трехволновые режимы генерации на соседних линиях. Основное внимание уделено описанию работы ЛУС в двухволновом режиме, представляющем интерес для применения в ЛРА ДП.

В ЛУС использован один из наиболее простых в техническом отношении и перспективных способов получения двухволнового потока излучения — переключение линий генерации при периодической модуляции длины резонатора  $L$  с амплитудой  $a \approx \lambda/4$ , причем равенство мощностей излучения на двух линиях поддерживается системой АПЧ, сигнал пробного воздействия которой служит для переключения линий [2].

Для практического использования двухволнового переключаемого режима в ЛГА ДП в лазере должен быть реализован двухволновый автограф, свободный от примесей излучения других линий и устойчивый к изменениям длины резонатора. Формирование автографа, под которым мы, как это принято в литературе, понимаем последовательность линий, наблюдаемую при изменении  $L$  на величину  $\lambda/2$ , происходит под воздействием двух факторов: конкуренции линий и взаимного положения частот линий относительно спектра мод резонатора [3–6].

Обычно в СО<sub>2</sub>-лазерах с дисперсионными резонаторами при высоких уровнях превышения усиления над потерями  $\eta$  условие самовозбуждения выполняется для нескольких линий. В этих условиях для получения двухволнового автографа нужно найти такую длину резонатора, чтобы для всех линий, лежащих выше порога возбуждения, отстройки центров линий от соответствующих мод резонатора  $\omega(J) = \nu(J) - m_J \Delta$  принимали два значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , где  $\nu(J)$  — частота центра линии,  $m_J$  — индекс продольной моды,  $\Delta = c/2L$  — межмодовый интервал резонатора,  $\Delta > \omega(J) \geq 0$ . В этом случае все линии разбиваются на две группы с равными или близкими отстройками, и при достаточно жесткой конкуренции в каждой группе будет генерировать только линия с наибольшим  $\eta$ . Необходимая длина резонатора определяется соотношением [6]:

$$L = (q_0 - r/p)L_2 + \delta L_2 = (Q - q/p)L_1 + \delta L_1, \quad (1)$$

где целые числа  $Q$  и  $q_0$  приблизительно выражают  $L$  в величинах периодов  $L_1$  и  $L_2$ , а  $p$ ,  $0 \leq r < p$  и  $0 \leq q < p$  определяют число линий в автографе и их размещение по группам. Малые поправки  $|\delta L_1| < \lambda/2$  и  $|\delta L_2| < L_1$  учитывают приближенный характер модели. Двухволновые автографы реализуются при выборе  $p = 2, 3, 4$ . Мы ограничимся случаем  $p = 2$ , т.к. только в этом случае взаимная отстройка групп  $\Omega = \omega_1 - \omega_2 = \Delta/2$ , что обеспечивает равномерное размещение линий в автографе, наиболее удобное для практических применений.

Периоды  $L_1$  и  $L_2$  определяются относительно базисной линии с вращательным квантовым числом  $J_0$ , выбранной из числа наиболее усиливающих линий при спектральном распределении усиления и потерь в конкретном лазере. В табл. 1 приведены значения периодов для наиболее распространенных симметричных изотопических модификаций молекулы СО<sub>2</sub>. Расчеты проведены на основании частот переходов, приведенных в [7], в качестве базисных линий выбраны  $P(20)$  и  $R(16)$ .

Периоды  $L_1$  и  $L_2$  (в мм) для наиболее распространенных изотопических модификаций молекулы  $\text{CO}_2$

Изотопическая модификация	Переход	$P$ -ветвь		$R$ -ветвь	
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$00^0 1-10^0 0$	2,761	203,7	3,750	200,6
	$00^0 1-02^0 0$	2,728	193,3	3,803	188,1
$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	$00^0 1-10^0 0$	2,843	255,6	3,633	249,9
	$00^0 1-02^0 0$	2,690	177,0	3,863	172,6
$^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$	$00^0 1-10^0 0$	3,010	188,0	4,374	185,8
	$00^0 1-02^0 0$	3,157	263,8	4,147	256,9

При  $p = 2$  принадлежность линий с вращательным квантовым числом  $J$  к одной из групп автографа определяется формулой

$$\frac{\omega(J)}{\Delta} = \left\{ q \frac{J - J_0}{4} + r \frac{(J - J_0)(J - J_0 - 2)}{16} \right\}, \quad (2)$$

где фигурными скобками обозначена дробная часть числа;  $r$  и  $q$  равны 0 или 1. Для группы, содержащей базисную линию,  $\omega_1 = 0$ , для другой группы  $\omega_2/\Delta = 1/2$ .

При значении длины резонатора  $L_{\text{одн}} \approx q_0 L_2$ , отвечающем  $r = 0$ ,  $q = 0$  в (1) и равном 81,6 см для конструкции ЛУС при работе на линиях центра  $P$ -ветви перехода  $00^0 1-10^0 0$   $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ , наблюдается одноволновой режим. При отстройке от  $L_{\text{одн}}$  на величину  $L_1/2$ , равную 1,4 мм для  $P$ -ветви основной изотопической модификации молекулы  $\text{CO}_2$ , можно наблюдать двухволновой автограф, соответствующий значениям  $r = 0$ ,  $q = 1$ , в котором соседние линии попадают в различные группы. Изменяя длину на  $L_2/2 \sim 10,2$  см ( $r = 1$ ), можно получить два двухволновых автографа с парным чередованием линий в группах, различающихся по длине на  $L_1/2$ . Размещение линий в группах двухволновых автографов приведено в табл. 2,  $\kappa = \pm 1, \pm 2 \dots$

При анализе устойчивости автографа сначала рассмотрим, как более простой, одноволновой случай, полагая, что выделяемая линия принята за базисную. При изменении длины резонатора от значения  $L_{\text{одн}}$  взаимные отстройки линий меняются по закону [5, 8]:

$$\Omega(JJ_0) = (\nu(J) - \nu(J_0)) \frac{L - L_{\text{одн}}}{L_{\text{одн}}}. \quad (3)$$

По достижении некоторого критического значения отстройки  $\Omega(JJ_0) = \Omega^*$  одноволновой режим генерации нарушается. Удвоенное значение изменения длины резонатора, приводящего к нарушению одноволнового автографа, примем за диапазон устойчивости (ДУ) одноволнового автографа. В случае жесткой конкуренции ДУ определяется формулой

$$\Delta L = \frac{2\Gamma L_{\text{одн}}}{|\nu(J) - \nu(J_0)|} \left( \sqrt{\frac{\eta(J_0)}{\eta(J)}} - \sqrt{\frac{\eta(J)}{\eta(J_0)}} \right), \quad (4)$$

где  $\Gamma$  — полуширина линии усиления; индексами  $J_0$  и  $J$  обозначены первоначально генерирующая линия и линия, генерация на которой появляется при наименьшем изменении длины. В резонаторе с автоколлимационной установкой дифракционной решетки конкуренция линий ослаблена из-за неполного перекрытия полей в лазере и соответствующий ДУ задается выражением [5]

$$\Delta L = \frac{2\Gamma L_{\text{одн}}}{|\nu(J) - \nu(J_0)|} \left\{ (\eta(J_0) - S\eta(J)) \left( \frac{\eta(J_0) - 1}{\eta(J_0)} - \frac{1}{S} \frac{\eta(J) - 1}{\eta(J)} \right) \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Входящий в (5) параметр связи конкурирующих линий  $S$  определяется геометрией резонатора и может быть легко найден для конкретных условий в следующем эксперименте. Лазер настраивается в двухволновой режим генерации при равных  $\eta$ , и подстройкой длины резонатора устанавливается такая взаимная отстройка между линиями  $\Omega_0$ , при которой зона совместной генерации (переключения) начинается на центре одной линии и заканчивается на центре другой. Используя данные [5], можно показать, что

$$S = 1 - \frac{\Omega_0^2}{\Gamma^2(\eta - 1)}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка (см. рис. 1) показала, что формула (5) позволяет с хорошей точностью прогнозировать величину ДУ.

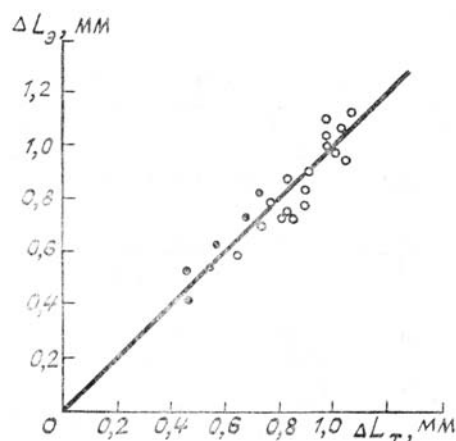


Рис. 1. Сравнение экспериментально измеренных ДУ  $\Delta L_{\text{э}}$  одноволнового автографа с ДУ, рассчитанными по (5)  $\Delta L_{\gamma}$ ;  $\circ$  —  $P$ -ветвь,  $\bullet$  —  $R$ -ветвь

Для получения двухволнового режима генерации на соседних линиях нужно настроить дифракционную решетку резонатора в положение автоколлимации на частоте, промежуточной между частотами выделяемых линий, так, чтобы их превышения были равны, и установить длину резонатора  $L_{gb}$ , при которой линии разбиваются на две группы, причем выделяемые линии должны оказаться в различных группах. Далее каждая группа может рассматриваться так же, как в одноволновом случае, и за ДУ двухволнового режима принимается наименьший из ДУ групп. Поскольку согласно (5) величина ДУ определяется разностями частот и превышениями конкурирующих линий, три рассмотренных выше двухволновых автографа, различающихся по составу групп, различаются и по устойчивости. Для определенности рассмотрим получение двухволновых режимов на линиях, расположенных в центре ветви, например  $P(18)$  и  $P(20)$ , выбрав последнюю в качестве базисной линии для расчета длин резонатора. Тогда, в случае  $r = q = 1$  рассматриваемые линии согласно табл. 2 попадают в одну группу и нужный режим реализовать не удастся. Сопоставляя два других режима, отметим, что при указанном способе настройки резонатора наиболее близкими по превышению к выделяемым линиям будут линии  $P(16)$  и  $P(22)$ , для которых  $\eta(16) \approx \eta(22)$ . Если в случае  $r = 0, q = 1$  с линией  $P(20)$  конкурирует линия  $P(16)$ , то в случае  $r = 1, q = 0$  — линия  $P(22)$ . В силу меньшей разности частот между линиями в последнем случае ДУ должен быть больше, что подтверждается экспериментом.

Таблица 2

#### Размещение линий в группах двухволновых автографов

Группа	Вращательные числа линий		
	$r=0, q=1$	$r=1, q=0$	$r=1, q=1$
1	$J_0+4\kappa$	$J_0+8\kappa$	$J_0+8\kappa$
2	$J_0+2+4\kappa$	$J_0+2+8\kappa$	$J_0+6+8\kappa$
		$J_0+4+8\kappa$	$J_0+2+8\kappa$
		$J_0+6+8\kappa$	$J_0+4+8\kappa$

На рис. 2 приведены расчетные зависимости ДУ для одно- и двухволновых режимов генерации (в последнем случае для  $r = 1, q = 0$ ) от числа Френеля  $N = b^2/\lambda L$ , где  $b$  — радиус апертуры резонатора. При расчете принято, что полное усиление за два прохода равно 0,35, а эффективность дифракционной решетки составляет 85%. Дифракционные потери для линий, каустики которых расположены под углом к оси резонатора, что характерно для резонаторов с автоколлимационной схемой установки дифракционной решетки, определены из работы [9]. В области малых чисел Френеля кривые на рис. 2 ограничены значениями, при которых линии, конкурирующие с выделяемыми, переходят в подпороговый режим. Поскольку данные [9] позволяют проводить расчеты только для  $N \lesssim 1,6$ , при сравнении с экспериментальными результатами проведена экстраполяция расчетной зависимости ДУ.

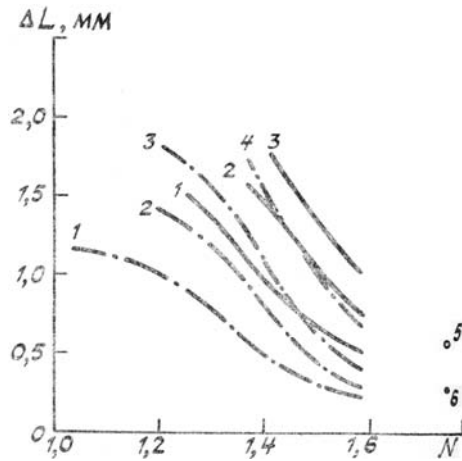


Рис. 2. Зависимость ДУ от числа Френеля для линий  $R$ -ветви (1, 3)  $P$ -ветви (2, 4) при использовании дифракционных решеток  $75 \text{ мм}^{-1}$  (1, 2) и  $100 \text{ мм}^{-1}$  (3, 4). 5 и 6 — значения ДУ, реализованные в ЛУС на линиях  $P$ - и  $R$ -ветвей соответственно с дифракционной решеткой  $75 \text{ мм}^{-1}$

Развитый в работе подход к управлению спектром генерации, положен в основу конструкции лазера с управляемым спектром генерации ЛУС. В ЛУС использован серийный активный элемент ГЛ-502 с внутренним глухим сферическим зеркалом. Резонатор лазера построен по автоколлимационной схеме с выводом излучения в нулевом порядке дифракции через плоское поворотное зеркало, параллельное дифракционной решетке. Для управления спектром генерации длина резонатора изменяется путем перемещения активного элемента относительно неподвижного узла дифракционной решетки. Диапазон изменения длины резонатора ( $650 - 830 \text{ мм}$ ) позволяет проводить настройку в нужный режим генерации для линий с  $6 \leq J \leq 40$  во всех ветвях переходов  $00^\circ 1 - 10^\circ 0$  и  $00^\circ 1 - 02^\circ 0$  молекулы  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ . В лазере предусмотрена возможность использования дифракционных решеток  $75$  или  $100 \text{ мм}^{-1}$  с диаметром  $27 \text{ мм}$ . Возможность работы в переключаемом режиме и использование системы АПЧ обеспечивается установкой дифракционной решетки на пьезокорректор КП-1.

Использование эффектов конкуренции линий и зависимости автографа лазера от длины резонатора позволило отказаться в конструкции ЛУС от снижения общего уровня превышения, обычно применяемого для увеличения ДУ. Из рис. 3, на котором показаны уровни дополнительных неселективных потерь, необходимых для обеспечения одноволнового режима генерации, в ЛУС и в лазере с аналогичными параметрами, но без использования описанной методики управления спектром генерации видно, что при больших апертурных размерах резонатора, а также при использовании дифракционных решеток с высоким коэффициентом отражения, ЛУС обеспечивает существенный выигрыш по мощности. При получении одно- или двухволновой генерации на линиях в центре  $P$ -ветви перехода  $00^\circ 1 - 10^\circ 0$  ЛУС обеспечивает мощность  $0,9 - 1 \text{ Вт}$  в одномодовом режиме для каждой линии.

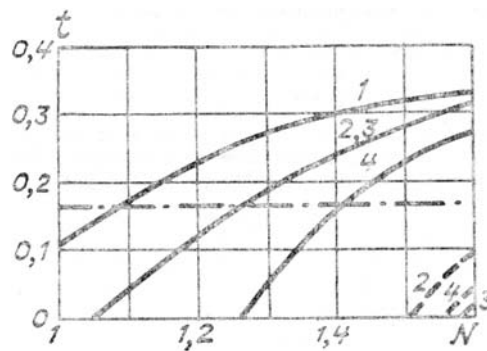


Рис. 3. Дополнительные неселективные потери, которые нужно ввести в резонатор для получения одноволновой генерации на линиях  $R$ -ветви (1, 3) и  $P$ -ветви (2, 4) при использовании дифракционных решеток  $75 \text{ мм}^{-1}$  (1, 2) и  $100 \text{ мм}^{-1}$  (3, 4): пунктир — при установлении одноволновой длины, сплошные линии — без использования описанной методики управления спектром. Для сравнения штрихпунктиром показан реальный уровень потерь в ЛУС

Опыт эксплуатации ЛУС в различных условиях показал, что первоначально установленный спектральный режим генерации не нарушается. ЛУС применялся в двух макетах ЛГА ДП. На двухканальном кюветном ЛГА ДП была получена стабильность нулевых показаний  $1,7 \cdot 10^{-4}$  за час, что позволяет проводить измерение концентраций аммиака с погрешностью  $0,2 \text{ млн}^{-1}$ . Применение ЛУС в ЛГА ДП «Трасса» описано в [10].

1. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Грибенюков А.И. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 20–26.
2. Герасимчук А.Г., Корнилов С.Т., Проценко Е.Д. //Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 1. С. 169–171.
3. Колосовский О.А. //В сб.: Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1970. № 9. С. 93–98.
4. Vuholz N. //IEEE J. Quant. Electr. 1982. V. QE-18. № 9. P. 1326–1331.
5. Коваль А.К., Миронов В.Д. //В сб.: Лазерные абсорбционные методы анализа микроконцентраций газов. М.: Энергоатомиздат. 1984. С. 39–46.
6. Коваль А.К., Миронов В.Д. //Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 11. С. 2324–2331.
7. Freed S., Bradley L.C., O'Donnell R.C. //IEEE J. Quant. Electr. 1980. V. QE-16. № 11. P. 1195–1206.
8. Корнилов С.Т., Проценко Е.Д., Чириков С.Н. //Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 6. С. 1225–1229.
9. Вельтюгов В.Н., Очкин В.Н., Соболев Н.Н. и др. Лазерные резонаторы с дифракционными решетками в автоколлимационном режиме. М., 1984, 41 с. (Препринт/ФИАН, № 37).
10. Ануфриев Э.В., Бирюлин В.П., Коваль А.К. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 42–46.

Московский инженерно-физический институт

Поступила в редакцию  
16 августа 1988 г.

A.K. Koval', V.D. Mironov. **Oscillation Spectrum Controlled CO<sub>2</sub>-laser for Differential Absorption Gas Analyser.**

The paper is concerned with the method of CO<sub>2</sub>-laser spectrum control based on rotovibrational lines competition and laser signature dependence on cavity length. The method gives an advantage of the more full utilization of active medium energetic potentialities. A laser signature stability range have been studied experimentally and theoretically, and both results agree well. Design of the LUS type CO<sub>2</sub>-laser (LUS is Russian abbreviation for Spectrum Controlled Laser) and LUS applications in atmospheric differential absorption spectrometry are briefly reported.