

Перестраиваемый CO₂-лазер с генерацией на секвенциальных и горячих переходах

Ю.Н.Булкин, Е.А.Кудряшов, С.А.Новиков, М.Ю.Дерюгин, А.А.Кузнецов

Теоретически и экспериментально исследована схема резонатора с отражательной дифракционной решеткой, обеспечивающей высокую частотную селективность, широкий спектральный интервал и низкий уровень потерь на выделяемой частоте. Рассчитаны и проанализированы частотно-селективные свойства указанного резонатора. Установлено, что зависимость приращенных потерь от диаметра диафрагмы при фиксированной частотной отстройке $\Delta\nu$ носит немономонный характер. Экспериментально получена генерация на 100 линиях традиционных полос и 36 линиях секвенциальных и горячих переходов. Минимальное расстояние между разрешаемыми линиями $\Delta\nu_L$ составляло $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$.

Ключевые слова: CO₂-лазер, оптический резонатор, спектр излучения.

1. Введение

В последнее время в области экологического мониторинга атмосферы значительные успехи достигнуты на базе метода оптоакустической спектроскопии с использованием перестраиваемых по линиям CO₂-лазеров [1, 2]. Однако их возможности используются далеко не в полной мере, поскольку в подавляющем большинстве случаев реализуется генерация только на традиционных переходах.

В то же время, наличие в спектре излучения линий секвенциальных и горячих полос позволит снизить на два порядка уровень фоновых сигналов, повысить чувствительность измерений и существенно расширить круг детектируемых веществ. Поэтому представляет практический интерес разработка перестраиваемых CO₂-лазеров, излучающих на линиях как традиционных $00^01 - [10^00, 02^00]$, так и секвенциальных $00^0n - [10^0(n-1), 02^0(n-1)]$ (где $n > 1$) и горячих $01^11 - 11^10$ полос.

Следует заметить, что для CO₂-лазеров, характеризующихся широким диапазоном спектра генерации и жесткой конкуренцией лазерных переходов, проблема селективности линий секвенциальных и горячих полос осложняется их близким расположением и значительной разницей в усилении с линиями традиционных переходов.

Известен метод селективности с помощью внутррезонаторной нагреваемой ячейки с CO₂, вносящей селективные потери на основных переходах [3]. Однако такое решение имеет ряд недостатков: дестабилизирующее действие теплового источника, дополнительные неселективные потери, инерционность переключения переходов, увеличение габаритов лазерной системы и т. п.

Ю.Н.Булкин, Е.А.Кудряшов, С.А.Новиков, М.Ю.Дерюгин. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37
А.А.Кузнецов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 27 ноября 2003 г., после доработки – 19 мая 2004 г.

Использование резонаторов с интерференционными элементами, обладающих высокой частотной селективностью, не пригодно для решения данной задачи из-за небольшой ширины спектрального интервала. Комбинированные резонаторы с двумя дисперсионными элементами сложны и очень чувствительны к разъюстировкам.

В данной работе рассматривается возможность разработки такого лазера на базе стандартной промышленной газоразрядной трубки ИЛГН-501 с дифракционной решеткой (ДР) в качестве дисперсионного элемента.

2. Выбор схемы резонатора

Предпринятые в [4] попытки выделения секвенциальных переходов, используя резонатор с дифракционной решеткой (ДР) в качестве дисперсионного элемента, привели к получению линий $P(27) - P(43)$ перехода $00^02 - 10^01$, для которых минимальное расстояние до ближайшего основного перехода составляет 0.63 см^{-1} .

Оптимизация параметра конфокальности g и числа Френеля N_F , проведенная в [5] для лазера с ДР в автоколлимационной установке и с аналогичными [4] длинами резонатора ($L_T \sim 137 \text{ см}$) и активной среды ($L_a \sim 100 \text{ см}$), позволила лишь незначительно улучшить ситуацию: в P -ветви перехода $00^02 - 10^01$ дополнительно выделена линия с $J = 25$, удаленная на 0.57 см^{-1} от соседней с ней линии основного перехода. Дальнейшее и заметное повышение селективности данной схемы возможно только при значительном увеличении ее габаритов. Причем, поскольку в этих резонаторах скорость нарастания потерь при отстройке от выделяемой частоты приблизительно пропорциональна $\sqrt{L_T}$ (при фиксированных g и N_F) [6], для двукратного улучшения остроты селективности необходимо использовать лазерную систему длиной не менее 5.5 м .

Это побудило нас использовать схему, в которой излучение при круговом обходе резонатора дважды отражается от дифракционной решетки. Предлагаемая конфигурация изображена на рис.1,а. Здесь, в отличие от схемы, описанной в [4] (см. рис.1,б), решетка расположена

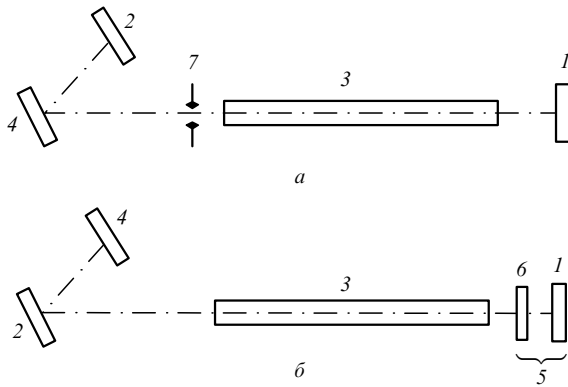


Рис.1. Схема исследуемого (а) и комбинированного (б) резонаторов: 1, 2 – сферические зеркала; 3 – активная среда; 4 – дифракционная решетка; 5 – отражающий интерферометр; 6 – дифракционный селектор; 7 – диафрагма.

между зеркалами и отсутствует второй дисперсионный элемент – отражающий интерферометр 5, образованный глухим зеркалом 1 и дифракционным селектором 6 [7].

Аналогичная конфигурация использовалась для селекции секвенциальных переходов в работе [8]. Наша схема отличается от нее наличием апертурной диафрагмы 7 с регулируемым диаметром d , которая существенно влияет на селективность.

3. Методика и результаты расчета

Уровень потерь наиболее добротной поперечной моды исследуемого резонатора определялся из уравнения, накладывающего условие самовоспроизведения (с точностью до постоянного коэффициента) пространственной конфигурации поля при круговом обходе,

$$\gamma u = \hat{K}u, \quad (1)$$

где u – распределение поля в плоскости, выбранной в качестве опорной; оператор \hat{K} обозначает преобразование поля при круговом обходе резонатора; комплексная константа γ определяет затухание моды и фазовый набег при круговом обходе.

Уравнение (1) решалось численно методом итераций [9, 10]. Трансформация поля при распространении между оптическими элементами резонатора вычислялась с помощью известного выражения

$$u(x_2, y_2) = \iint_{S_n} \frac{\exp(ikL_m)}{i\lambda L_m} \exp \left\{ \frac{ik}{2L_m} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \right\} u(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

где $u(x_1, y_1)$ – исходное распределение поля в плоскости одного из элементов; $u(x_2, y_2)$ – распределение поля после прохождения участка длиной L_m ($m = 1, 2, 3$); $k = 2\pi/\lambda$. Интегрирование проводилось в пределах круглых апертурных диафрагм S_n : $\{x \in [-A_n, A_n], y \in [-(A_n^2 - x^2)^{1/2}, (A_n^2 - x^2)^{1/2}]\}$ ($n = 1, 2$), где $2A_1$ – апертура зеркал и ДР, $2A_2 = d$ – диаметр диафрагмы 7. Сферические зеркала 1 и 2 рассматривались как квадратичный фазовый корректор и их влияние учитывалось добавлением фазового множителя $\exp[-(ik/R_j)(x^2 + y^2)]$ ($j = 1, 2$). Дифракционная решетка моделировалась эквивалентным пло-

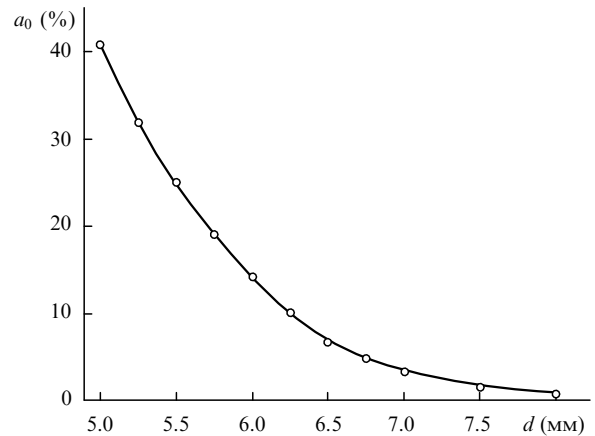


Рис.2. Зависимость уровня неселективных потерь a_0 от диаметра диафрагмы d .

ским зеркалом с переменным углом разъюстировки α , связанным с отстройкой $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ относительно выделяемой частоты ν_0 формулой $\alpha = (\Delta\nu/\nu_0) \tan \varphi_0$, где φ_0 – угол автоколлимации для частоты ν_0 . Преобразование поля при отражении от плоского зеркала, наклоненного на угол α , учитывалось умножением на выражение $\exp(-ik2x\alpha)$. Влиянием линзового эффекта при прохождении излучения через активную среду пренебрегалось.

С использованием указанной методики были рассчитаны частотно-селективные зависимости и уровень неселективных потерь в диапазоне длин волн 9.2–11.2 мкм для резонатора, параметры которого были таковы: расстояние между зеркалом 1 и диафрагмой $L_1 = 125$ см, между диафрагмой и решеткой $L_2 \sim 13$ см, зеркало 2 было расположено на расстоянии $L_3 = 22$ см от решетки. Радиусы кривизны зеркал 1 и 2 составляли $R_1 = 3$ м, $R_2 = 7$ м, дифракционная решетка имела 150 штр./мм (угол блеска около 54°). Диаметры апертур зеркал и решетки равнялись 14 мм, диаметр апертурной диафрагмы изменялся в пределах от 5 до 8 мм.

Исследовались свойства резонатора при различных размерах апертурной диафрагмы. Установлено, что уровень неселективных потерь a_0 монотонно убывает при увеличении диаметра диафрагмы от 5.0 до 8.0 мм. В частности, в области $\lambda = 10.6$ мкм он, изменяясь от 40 % до 0.8 %, перекрывает практически весь диапазон потерь, приемлемых для лазера с активной средой длиной ~ 100 см (см. рис.2). В то же время, зависимость приращения потерь $\Delta a = a - a_0$ от диаметра диафрагмы при фиксированной величине частотной отстройки $\Delta\nu$ носит немонотонный характер. Причем значение диаметра, при котором наблюдается максимум селективных потерь, увеличивается с ростом $\Delta\nu$. Соответствующие графики приведены на рис.3. Так, например, для частотной отстройки $\Delta\nu = 10$ ГГц (кривая 1) наибольшее приращение потерь, $\Delta a = 28$ %, достигается при диаметре 5.5 мм. Для отстроек $\Delta\nu = 20$ и 35 ГГц (кривые 2, 3) соответствующие значения d составляют 6.25 ($\Delta a = 66$ %) и 7 мм ($\Delta a = 84$ %).

Дополнительную информацию о селективности исследуемого резонатора можно получить из рис.4, на котором представлены частотные зависимости потерь при различных диаметрах диафрагмы. Там же для сравнения показана наиболее крутая из аналогичных зависимостей для резонатора с дифракционной решеткой в автоколлимационной установке (длина резонатора и дисперсия решетки для обоих случаев одинаковы).

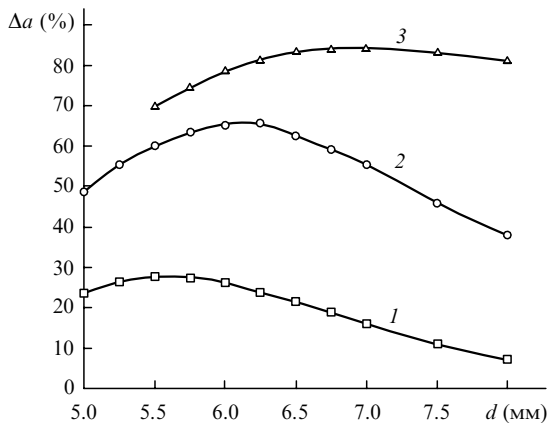


Рис.3. Зависимость приращения потерь Δa от диаметра диафрагмы d при фиксированной величине частотной отстройки Δν = 10 (1), 20 (2) и 35 ГГц (3).

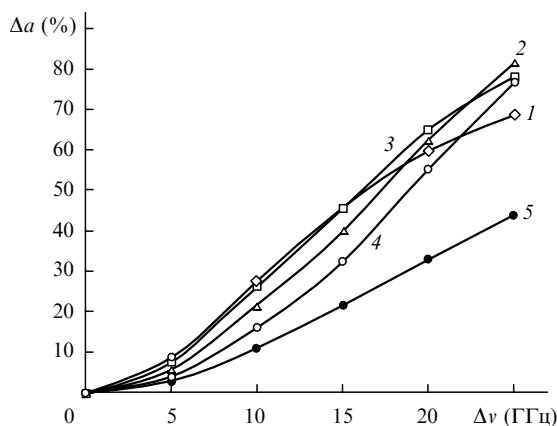


Рис.4. Зависимость приращения потерь от частотной отстройки при различных диаметрах диафрагмы: d = 5.5 (1), 6 (2), 6.5 (3) и 7 мм (4). Кривая 5 – зависимость для автоколлимационной схемы.

Из рис.4 видно заметное улучшение селективности предложенной конфигурации по сравнению с традиционной автоколлимационной схемой. Кроме того, приведенные данные позволяют выбирать размеры апертурной диафрагмы в зависимости от решаемых задач. В частности, в нашем случае для выделения близко лежащих нетрадиционных линий ($\Delta\nu \leq 10$ ГГц) диаметр диафрагмы должен составлять $\sim 5.5 - 6$ мм. В то же время, для подавления линий, отстоящих от селектируемой на большее расстояние ($\Delta\nu \geq 25$ ГГц), например, при селекции основных переходов, d следует увеличить.

4. Схема установки и результаты эксперимента

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.5, была аналогична описанной в [5]. Перестраиваемый по линиям CO₂-лазер состоял из активного элемента 2 (стандартной промышленной газоразрядной трубки ИЛГН-501) с одним внутренним сферическим зеркалом 4 с радиусом кривизны $R_1 = 3$ м. Длина активной среды составляла 100 см. Спектральные характеристики лазерного излучения измерялись с помощью панорамного спектрографа. Мощность генерации регистрировалась с помощью измерителя мощности ИМО-4.

Разработанный CO₂-лазер позволяет селектировать 100 линий традиционных полос, в том числе 52 линии перехода $00^01 - 10^00$ (P(4)–P(56) и R(2)–R(50)) и 48 линий перехода $00^01 - 02^00$ (P(4)–P(52) и R(4)–R(48)). Помимо этого получена генерация на 36 линиях секвенциальных и горячих полос, из них 17 линий перехода $00^02 - 10^01$ (P(11)–P(43)) и 19 линий перехода $01^11 - 11^10$ (P(14)–P(32)).

Минимальное расстояние между разрешаемыми линиями, каковыми в нашем случае являются секвенциаль-

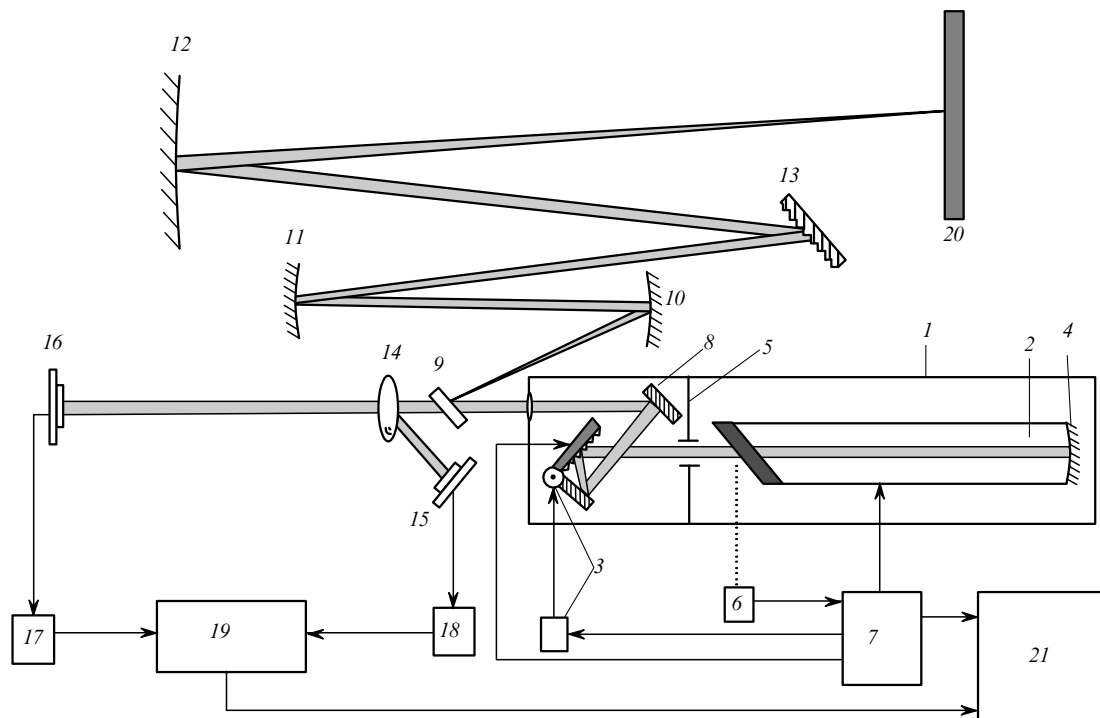


Рис.5. Схема экспериментальной установки:
 1 – корпус; 2 – активный элемент; 3 – дифракционная решетка с уголковым отражателем и пьезокорректором; 4 – глухое зеркало; 5 – диафрагма; 6 – датчик (MG-30); 7 – блок питания; 8 – поворотное зеркало; 9 – полупрозрачная пластина из NaCl; 10–12 – сферические зеркала; 13 – дифракционная решетка; 14 – прерыватель; 15, 16 – датчики; 17, 18 – усилители; 19 – АЦП; 20 – термокран; 21 – ПК.

Табл.1.

Номер линии перехода 00^02-10^01	Расстояние до ближайшего основного перехода (см^{-1})	Условия эксперимента				Данная работа
		[4]*	[5]*	[8]**	[4]***	
P(11)	0.22	-	-	-	-	+
P(13)	0.27	-	-	-	+	+
P(15)	0.32	-	-	+	+	+
P(17)	0.37	-	-	+	+	+
P(19)	0.42	-	-	+	+	+
P(21)	0.48	-	-	+	+	+
P(23)	0.52	-	-	+	+	+
P(25)	0.57	-	+	+	+	+
P(27)	0.63	+	+	+	+	+
P(29)	0.66	+	+	+	+	+
P(31)	0.75	+	+	+	+	+
P(33)	0.81	+	+	+	+	+
P(35)	0.87	+	+	+	+	+
P(37)	0.92	+	+	+	+	+
P(39)	1.08	+	+	+	+	+
P(41)	1.04	+	+	-	+	+
P(43)	1.01	+	+	-	+	+

* Резонатор с ДР в автоколлимационном режиме; ** резонатор с двухкратным отражением от ДР; *** резонатор с ДР и отражающим интерферометром.

ная P(11) и основная P(14), $\Delta\nu_L = 0.22 \text{ см}^{-1}$. Мощность генерации составляла от 0.05–0.2 Вт на линиях секвенциальных и горячих полос до 1–3 Вт на линиях основных полос молекулы CO_2 .

Для сравнения селективных свойств различных типов резонаторов в табл.1 приведены линии P-ветви перехода 00^02-10^01 и частотные отстройки до ближайшей к каждой из них линии основного перехода 00^01-00^01 . Знаком «+» отмечены линии, выделенные ранее и в данной работе с использованием следующих схем резонаторов: с ДР в автоколлимационном режиме, с двумя отражениями от ДР при круговом обходе, комбинированных с двумя дисперсионными элементами (интерферометр и ДР).

Из табл.1 видно, что представленные нами результаты превосходят полученные ранее даже при помощи более сложных комбинированных резонаторов, для которых $\Delta\nu_L = 0.27 \text{ см}^{-1}$ при той же длине активной среды (1 м). Более заметное улучшение наблюдается по сравнению с результатами, полученными в работе [8] с использованием аналогичной схемы резонатора. В [8] при большей длине активной среды (1.5 м) обеспечивается разрешение $\Delta\nu_L = 0.32 \text{ см}^{-1}$, и в P-ветви перехода 00^02-10^01 выделено на 4 линии меньше.

5. Заключение

Теоретически и экспериментально исследована схема резонатора с отражательной дифракционной решеткой, обеспечивающего высокую частотную селективность, широкий спектральный интервал и низкий уровень потерь на выделяемой частоте.

Рассчитаны и проанализированы частотно-селективные свойства указанного резонатора. Установлено, что зависимость приращения потерь от диаметра диафраг-

мы при фиксированной частотной отстройке $\Delta\nu$ носит немонотонный характер. Причем значение диаметра, при котором наблюдается максимум селективных потерь, увеличивается с ростом $\Delta\nu$, что позволяет выбирать оптимальные для каждой из решаемых задач размеры апертурной диафрагмы.

Разработанный с использованием исследованной схемы перестраиваемый CO_2 -лазер при длине активной среды $\sim 100 \text{ см}$ позволяет селективировать помимо 100 линий традиционных полос 36 линий на секвенциальных и горячих переходах. При этом минимальное расстояние между разрешаемыми линиями $\Delta\nu_L$ составляет $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$.

Эти результаты превосходят полученные ранее при помощи аналогичной схемы с большей длиной активной среды (150 см), обеспечивающей разрешение $\Delta\nu_L \sim 0.3 \text{ см}^{-1}$, и схемы, использующей комбинированные резонаторы с двумя дисперсионными элементами при той же длине активной среды.

1. Адаменков А.А., Булкин Ю.Н., Бузовера В.В. и др. *Квантовая электроника*, **22**, 29 (1995).
2. Адаменков А.А., Булкин Ю.Н., Колобянин Ю.В., Кудряшов Е.А. *Оптика атмосферы*, **8**, 549 (1995).
3. Reid J., Siemsen K. *J. Appl. Phys.*, **48**, 2712 (1977).
4. Автономов В.П., Бельтюгов В.Н., Кузнецов А.А. и др. *Квантовая электроника*, **9**, 2155 (1982).
5. Bulkin Y.N., Adamenkov A.A., Kudryashov E.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3930**, 24 (2000).
6. Бельтюгов В.Н., Кузнецов А.А., Очкин В.Н. и др. *Труды ФИАН*, **221**, 6 (1992).
7. Троицкий Ю.В. *Одночастотная генерация в газовых лазерах* (Новосибирск: Наука, 1975, с. 160).
8. Solodukhin A.S. *J. Mod. Opt.*, **34** (4), 577 (1987).
9. Fox A.G., Li T. *Bell Syst. Tech.*, **40**, 453 (1961).
10. Kuznetsov A.A., Novgorodov M.Z. In «*Optical Resonators – Science and Engineering*» (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998, p. 441).