

**И.В. Шерстов, К.В. Бычков, В.А. Васильев, А.И. Карапузиков,  
В.В. Спицын, С.Б. Черников**

## **Двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система для гетеродинного лидара**

*Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 26.08.2004 г.

Разработан перестраиваемый волноводный CO<sub>2</sub>-лазер с ВЧ-накачкой. Модовые биения подавлены путем оптимизации оптической схемы волноводного резонатора. Лазер излучает на более чем 70 линиях при мощности генерации 0,3...3 Вт в одномодовом одночастотном режиме. На основе двух таких лазеров разработана двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система с управлением от компьютера, предназначенная для работы в составе мобильного гетеродинного лидара дифференциального поглощения. Частоты лазеров могут быть стабилизированы на центрах линий или синхронизированы с требуемой отстройкой. Лазерная система прошла испытания в полевых условиях в составе мобильного гетеродинного лидара дифференциального поглощения и показала удовлетворительные результаты. Разработанная лазерная система может быть использована как двухчастотный источник стабилизированного излучения в составе трассового газоанализатора прямого детектирования.

### **Введение**

В связи с возрастающими темпами загрязнения окружающей среды промышленными отходами дистанционное зондирование атмосферы, в том числе дистанционный газоанализ, с помощью различных лидарных систем является актуальной проблемой [1–5]. Среди прочих лидарные системы дифференциального поглощения (ДП) обладают наивысшей концентрационной чувствительностью [1]. В УФ- и видимом диапазонах спектра с помощью метода ДП возможно детектирование лишь нескольких важных загрязнителей атмосферы: NO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> и др. [3–5]. В среднем ИК-диапазоне (4–12 мкм) находится наибольшее количество разрешенных спектральных линий поглощения различных веществ, в том числе углеводов, что позволяет с высокой селективностью проводить дистанционный газоанализ атмосферы.

Предельная чувствительность и дальность действия лидарных систем прямого детектирования в среднем ИК-диапазоне спектра ограничены тепловыми токами детекторов (HgCdTe, InSb), имеющих величину  $D^* = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$  [6]. При гетеродинном приеме лидарных сигналов теоретически достигается квантовый предел чувствительности ИК-детекторов, при этом дальность зондирования гетеродинных лидарных систем существенно повышается [7]. Поэтому интерес к гетеродинным ИК-лидарам дифференциального поглощения достаточно высок, несмотря на их сложность и высокую стоимость по сравнению с лидарами прямого детектирования.

В работе [8] представлено описание гетеродинного ИК-лидара на основе CO<sub>2</sub>-лазеров, предназначенного для измерения рассеяния от атмосферного

аэрозоля и облаков. Для зондирования атмосферы использовался одночастотный импульс излучения ТЕА – CO<sub>2</sub>-лазера, который формировался при инжекции в его резонатор излучения непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера-инжектора с оптогальванической стабилизацией частоты. Для обеспечения гетеродинного приема лидарных сигналов был использован второй непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер-гетеродин, частота излучения которого была синхронизирована с частотой лазера-инжектора с отстройкой 30 МГц. Все лазеры излучали на одной длине волны и не имели возможности оперативной перестройки на другие линии генерации.

Развитие современных систем локального и дистанционного газоанализа атмосферы требует создания лазеров и лазерных систем, способных длительное время работать в автоматическом режиме. Такой режим работы предусматривает автоматическую установку длин волн излучения лазеров на заданные линии генерации в соответствии с алгоритмом работы лидарной системы, изменение и стабилизацию требуемых параметров излучения в условиях механико-климатических воздействий. К лазерам для гетеродинных лидарных систем предъявляются особые требования, поскольку в этом случае требуется одномодовое одночастотное излучение с определенной стабильностью частоты.

В настоящей статье представлена двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система, предназначенная для работы в составе мобильного гетеродинного ИК-лидара дифференциального поглощения по схеме [8]. Базовыми элементами этой системы являются два волноводных CO<sub>2</sub>-лазера с ВЧ-возбуждением с автоматической перестройкой от компьютера и стабилизацией частоты излучения на центр выбранной линии генерации.

# 1. Волноводный перестраиваемый лазер

Волноводные CO<sub>2</sub>-лазеры отличаются малыми размерами по сравнению с CO<sub>2</sub>-лазерами других типов, а также высоким коэффициентом усиления, что необходимо для достижения генерации на слабых линиях и расширения спектрального диапазона перестройки. Использование ВЧ-возбуждения CO<sub>2</sub>-лазеров позволило устранить проблемы, связанные с наличием высоковольтных источников питания и уменьшить уровень шумов разряда [9]. Кроме того, отпаянные CO<sub>2</sub>-лазеры с ВЧ-возбуждением имеют более высокий срок службы по сравнению с лазерами с РПТ [10].

В настоящей работе использован волноводный CO<sub>2</sub>-лазер с ВЧ-возбуждением с металлокерамическим волноводом квадратного сечения. Корпус лазера изготовлен из трубы Ø88×650 мм из нержавеющей стали. Труба служит вакуумной оболочкой и основой оптического резонатора. На обоих торцах трубы приварены фланцы, на которых установлены оптические элементы лазера с вакуумными уплотнителями. Как показали эксперименты, такие лазеры отличаются высокой жесткостью конструкции и слабо чувствительны к внешним механическим воздействиям.

Металлокерамический волновод размерами 2,2×2,2×450 мм образован двумя плоскими электродами из оксидированного алюминия и двумя плоскими пластинами из полированного лейкосапфира. Нижний электрод соединен с корпусом, имеет нулевой потенциал, охлаждается проточной водой. Верхний электрод изолирован от корпуса, охлаждается благодаря высокой теплопроводности лейкосапфировых пластин. При подаче ВЧ-напряжения на верхний электрод в волноводе поджигается емкостной разряд, который используется для возбуждения газовой среды лазера. Для выравнивания напряженности ВЧ-поля вдоль электродов использованы несколько индуктивностей, подключенных параллельно электродам в определенных местах. Для согласования импедансов ВЧ-генератора и нагрузки использована LC-схема согласования.

Наличие в лазере волновода повышает коэффициент использования активного объема. Однако при этом в ряде случаев снижается модовая селективность, что требует выбора соответствующей схемы оптического резонатора. Обычно в волноводных лазерах используются плоские зеркала, установленные вплотную к торцам волновода. Такая схема оптического резонатора получила название тип I согласно принятой классификации [11, 12]. В этом случае достигаются минимальные потери связи и максимальная мощность генерации волноводного лазера, однако наблюдаются низкая модовая и спектральная селективности резонатора. Для повышения селективности резонатора выбрана схема оптического резонатора типа III [11, 12], в которой используются вогнутые сферические зеркала с радиусом кривизны  $R$ , установленные от торцов волновода на расстоянии

$$z = b = \pi w_0^2 / \lambda = R/2, \quad (1)$$

где  $b$  – конфокальный параметр «приблизительно гауссова» пучка;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $w_0 = 0,7032a$  – радиус гауссовой лучевой перетяжки, в которой наилучшим образом совпадают интегральный гаусс с модовым распределением  $EH_{11}$  в квадратном волноводе с шириной  $2a$  [11]. Согласно [13] в таком резонаторе мода  $EH_{11}$  испытывает потери связи 1,4%, а потери моды  $EH_{12}$  составляют около 78%. Таким образом, оптический резонатор типа III обеспечивает высокую степень дискриминации поперечных мод в волноводном лазере.

На рис. 1 представлена оптическая блок-схема перестраиваемого волноводного лазера. Излучение выводится через плоское полупрозрачное зеркало с коэффициентом пропускания 4%.

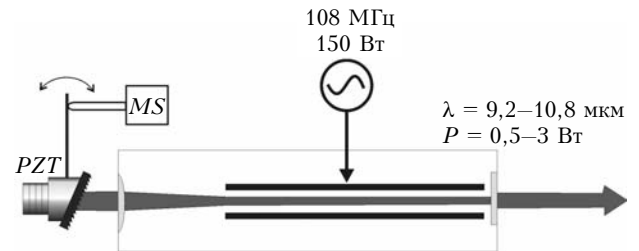


Рис. 1. Оптическая блок-схема перестраиваемого волноводного CO<sub>2</sub>-лазера с ВЧ-возбуждением: PZT – пьезоэлектрический преобразователь; MS – моторизованный линейный толкатель

В качестве заднего глухого сферического зеркала, установленного по схеме оптического резонатора типа III, использована комбинация из просветленной плосковыпуклой линзы из ZnSe и плоской отражательной дифракционной решетки, работающей в автоколлимационном режиме. Эффективное фокусное расстояние  $f$  системы «линза–решетка–линза» определяется фокусным расстоянием линзы  $f_1$  и расстоянием между линзой и решеткой  $z_1$ . Кроме того, согласно выражению (1)  $z = R/2 = f$  и зависит от  $\lambda$ . В табл. 1 представлены результаты расчета величины  $z = \pi w_0^2 / \lambda$  и соответствующий радиус кривизны  $R$  эквивалентного сферического зеркала в зависимости от длины волны.

Таблица 1

Параметр	Длина волны, мкм			
	9,2	9,6	10,2	10,8
$b = \pi w_0^2 / \lambda$ , мм	204	196	184	174
$R$ , мм	408	392	368	348

Для рассмотренного резонатора с сечением волновода 2,2×2,2 мм в спектральном диапазоне перестройки CO<sub>2</sub>-лазера (9,2...10,8 мкм) величина  $z$  изменяется от 204 до 174 мм. Поэтому было выбрано среднее оптимальное значение  $z = 180$  мм, соответствующее длине волны  $\lambda \approx 10$  мкм. Учитывая, что расстояние между линзой и решеткой  $z_1 = 35$  мм, фокусное расстояние линзы должно быть равно  $f_1 = 320$  мм. Такая линза была использована на первом этапе исследования лазера. Как показали эксперименты, в этом случае обеспечиваются минимальные потери и максимальная выходная мощность.

В лазере использована дифракционная решетка с золотым покрытием с периодом  $150 \text{ мкм}^{-1}$ . Эффективность отражения решетки в первый порядок дифракции для *s*-поляризации по отношению к падающей мощности составила 0,93–0,95. Направление штрихов решетки выбрано перпендикулярным к плоскости металлических электродов, так как излучение волноводных лазеров с металлокерамическими волноводами имеет линейную поляризацию, вектор которой направлен параллельно металлическим электродам.

Отметим, что расположение дифракционной решетки за линзой повышает спектральное разрешение решетки, поскольку поперечный размер лазерного пучка на расстоянии  $z = b$  от торца волновода в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем на выходе из волновода [14]. Кроме того, в этом случае уменьшается плотность мощности излучения на решетке, которая при размещении решетки в резонаторе лазера составляет  $\sim 1500 \dots 2000 \text{ Вт/см}^2$ .

Решетка установлена в прецизионном поворотном узле рычажного типа, длина рычага 80 мм. Поворот решетки производился серийным линейным толкателем (модель 8MS00-25, «EKSMa Co.») с приводом от шагового двигателя, имеющим полный ход 25 мм, шаг микровинта 0,25 мм, шаговый двигатель 200 шагов на оборот. В линейном толкателе встроены механические датчики начального и конечного положений, однако воспроизводимость включения этих датчиков составила приблизительно  $\pm 5$  шагов. Для повышения точности определения нулевого положения решетки на вал шагового двигателя был установлен радиальный оптический датчик, имевший точность позиционирования 1 шаг, что соответствовало угловому перемещению решетки  $\Delta\varphi \approx 16 \text{ мкрад}$ . Поворотный узел позволял с высокой точностью и воспроизводимостью настраивать требуемое угловое положение дифракционной решетки при перестройке лазера по линиям генерации.

Для работы с различными изотопами молекулы  $\text{CO}_2$  определены средние и крайние угловые положения дифракционной решетки, которые представлены в табл. 2.

Расчет для каждого изотопа ограничен спектральным диапазоном от линии  $P(40)$  перехода  $001 \rightarrow 100$  до линии  $R(40)$  перехода  $001 \rightarrow 02^{00}$ , который практически является предельным для рассматриваемого лазера. Частоты переходов взяты из работы [15]. Так, в частности, при использовании молекулы  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  диапазон углового перемещения решетки составляет от  $43,48$  до  $54,18^\circ$  при среднем положении  $48,83^\circ$ .

Длина резонатора лазера составила  $L = 660 \text{ мм}$ , что соответствует межмодовому интервалу  $c/2L = 227 \text{ МГц}$ . Для тонкой перестройки частоты излучения лазера в пределах контура усиления ( $FWHM \sim$

$\sim 300 \text{ МГц}$ ) использован пакет из пьезоэлектрических преобразователей типа ПП-12, которые производили изменение длины резонатора. При подаче на преобразователи напряжения  $\pm 250 \text{ В}$  длина резонатора лазера изменялась на  $\pm 4 \text{ мкм}$ , что позволяло устанавливать частоту излучения лазера в любой выбранной точке контура усиления, в том числе на центр линии генерации.

Исследование спектрального состава излучения изготовленных волноводных лазеров показало, что на сильных линиях генерации, особенно в 10-микронной области, в излучении появлялись паразитные модовые биения на частотах от единиц до 20–40 МГц. Этот эффект описан в нескольких работах, получил название «hooting modes» [16]. Появление этих модовых биений связывается с некоторым малым отличием поперечного сечения волновода от квадратного [16], что практически всегда присутствует в реальных волноводных лазерах. На рис. 2, а представлена осциллограмма контура линии излучения волноводного лазера, в котором была установлена внутрирезонаторная линза с  $f_1 = 320 \text{ мм}$ , рассчитанная выше. Как видно, при использовании такой линзы на склоне контура излучения лазера присутствует область с ярко выраженными модовыми биениями. При уменьшении мощности ВЧ-накачки лазера удавалось подавить эти биения, однако лазер в этом случае работал неустойчиво вблизи порога генерации.

Для борьбы с нежелательными модовыми биениями были увеличены селективные потери в волноводном лазере. Эксперименты с рядом линз с различным фокусным расстоянием показали, что при увеличении фокусного расстояния внутрирезонаторной линзы область возникновения модовых биений сокращалась, а при  $f_1 > 410 \text{ мм}$  модовые биения не наблюдались ни на одной линии генерации лазера. На рис. 2, б представлена осциллограмма контура линии излучения лазера с внутрирезонаторной линзой с  $f_1 = 450 \text{ мм}$ , на котором отсутствуют модовые биения. Мощность излучения лазера при этом незначительно упала (на 10–15%), однако одночастотный режим генерации был достигнут.

Исследование пучка в дальней зоне показало, что распределение интенсивности излучения в поперечном сечении в дальней зоне соответствовало гауссову профилю, т.е. лазер излучал на низшей волноводной моде  $EH_{11}$ . На рис. 3 представлено поперечное распределение интенсивности излучения лазера. Диаметр пучка  $2r$  на расстоянии 185 см от выходного зеркала, измеренный по уровню  $e^{-2}$ , составил 16,4 мм для  $\lambda = 9,2 \text{ мкм}$  и 17,3 мм для  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ . Полная расходимость пучка (2 $\theta$ ) на длинах волн 9,2 и 10,6 мкм составила соответственно 8,8 и 9,4 мрад.

Таблица 2

Изотоп $\text{CO}_2$	001 $\rightarrow$ 02 <sup>00</sup> R(40)		001 $\rightarrow$ 100 P(40)		Диапазон, град	Среднее положение, град
	$\lambda$ , мкм	Угол, град	$\lambda$ , мкм	Угол, град		
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	9,17	43,48	10,81	54,18	10,70	48,83
$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	9,58	45,95	11,38	58,63	12,68	54,48
$^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$	9,03	42,60	10,71	53,42	10,82	48,01
$^{13}\text{C}^{18}\text{O}_2$	9,52	45,54	11,16	56,79	11,25	51,17
$^{14}\text{C}^{16}\text{O}_2$	9,92	48,06	12,02	64,38	16,32	56,22
$^{14}\text{C}^{18}\text{O}_2$	9,94	48,20	11,66	60,96	12,76	54,58

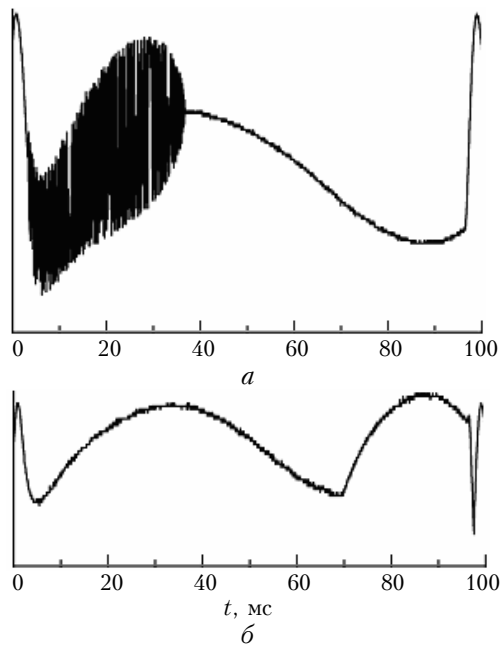


Рис. 2. Осциллограммы контура линии излучения волноводного лазера с внутррезонаторными линзами, имеющими фокусное расстояние  $f_1 = 320$  (а) и 450 мм (б)

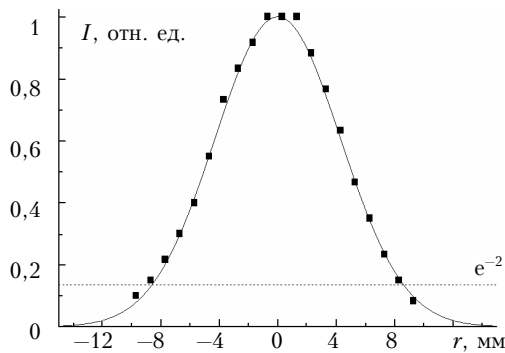


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера в поперечном сечении пучка на расстоянии 185 см от лазера. Длина волны  $\lambda = 10,6$  мкм

Спектр излучения волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера на изотопе  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  представлен на рис. 4. Лазер излучал на более чем 70 линиях при мощности генерации до 2,5–3 Вт на сильных линиях и до 0,3–0,5 Вт на слабых. Перестройка длины волны излучения производилась автоматически в соответствии с индивидуальной калибровочной таблицей для каждого лазера.

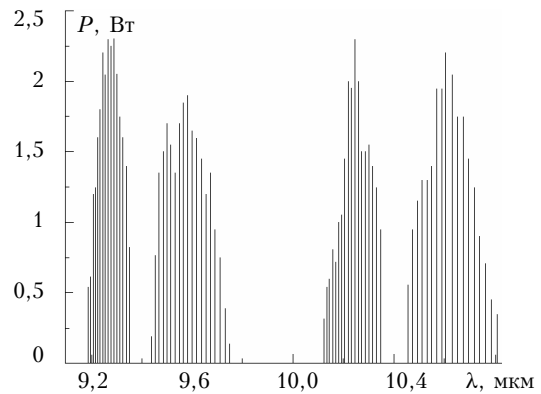


Рис. 4. Спектр излучения перестраиваемого волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера

Основные параметры разработанного перестраиваемого волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера представлены в табл. 3, а на рис. 5 приведен внешний вид лазера.

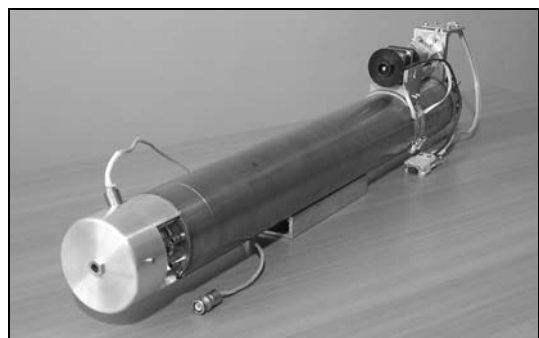


Рис. 5. Внешний вид перестраиваемого волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера с ВЧ-возбуждением

Таблица 3

Параметр	Величина
Режим работы	Непрерывный, импульсно-периодический
Спектральный диапазон излучения, мкм	9,2–10,8
для изотопа $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	9,6–11,4
для изотопа $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	
Мощность излучения, Вт	2,5–3
на сильных линиях	Не менее 0,5
на слабых линиях	Не менее 60
Количество линий излучения (для $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ )	Одномодовый, одночастотный
Модовый состав излучения	Линейная
Поляризация излучения	2
Диаметр пучка на выходе, мм	8,8–9,4
Расходимость (полная, $e^{-2}$ ), мрад	ВЧ-разряд, 108
Возбуждение активной среды, МГц	150
Мощность ВЧ-генератора накачки, Вт	Водяное, 2 л/мин
Охлаждение (излучатель + ВЧ-генератор)	+24 В / 400 ВА
Питание / потребляемая мощность	
Габаритные размеры, мм	
излучателя	840×90×150
ВЧ-генератора накачки	433×100×42
Масса, кг	
излучателя	10
ВЧ-генератора накачки	3

## 2. Двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система

На основе двух перестраиваемых одночастотных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров, описанных выше, разработана двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система для использования в составе гетеродинного лидара дифференциального поглощения, подобного [8]. Лазерная система предназначена для управления спектром зондирующего импульса ТЕА–СО<sub>2</sub>-лазера путем инъекции в его резонатор стабилизированного на центр линии излучения лазера-инжектора, а также для обеспечения гетеродинного приема лидарных эхосигналов в спектральном диапазоне 9,2...10,8 мкм.

Оптическая блок-схема двухканальной CO<sub>2</sub> лазерной системы представлена на рис. 6. В ее состав входят два перестраиваемых волноводных CO<sub>2</sub>-лазера с ВЧ-генераторами накачки, оптико-механическая схема (делительные и поворотные зеркала, детектор и др.), контроллер. Лазеры 1 и 2 излучали на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в соответствии с калибровочными таблицами каждого лазера, и возбуждались отдельными ВЧ-генераторами *RF*. Перестройка длин волн излучения производилась угловым перемещением дифракционных решеток с помощью линейных толкателей *MS*. Для тонкой перестройки частоты излучения лазера использованы пьезоэлектрические преобразователи *PZT*.

Основная часть излучения лазеров 1 и 2 выводилась из лазерной системы для дальнейшего использования по назначению. Небольшая часть излучения лазеров (по ~5%) отщеплялась от основных пучков делителями *M1* и *M2*, затем волновые фронты пучков совмещались на делителе *M4*, линза *L*

фокусировала пучки на детектор *D*. В качестве детектора использован неохлаждаемый HgCdZnTe фотovoltaический приемник PDI-10.6 «VIGO System» с постоянной времени  $\tau \leq 1$  нс. Детектор позволял контролировать непрерывную мощность лазеров, наблюдать контуры линий излучения, величину и частоту высокочастотных биений.

Для отдельного прерывания лазерных пучков, падающих на детектор, использованы электромеханические прерыватели *Ch1* и *Ch2*. Для ступенчатого ослабления мощности излучения, падающей на детектор, использованы ослабители *Att* с различным пропусканием, установленные на турели с приводом от шагового двигателя. Кроме того, в оптической схеме предусмотрено использование обтюлятора *Obt* с приводом от шагового двигателя, который с частотой 10 Гц прерывал излучение, падающее на детектор, а также одновременно прерывал оптическую связь между лазерами 1 и 2. Обтюратор предназначен для защиты детектора от перегрузок при работе одного из лазеров в качестве инжектора в паре с ТЕА–СО<sub>2</sub>-лазером, а второго лазера – в качестве гетеродина. Включение ТЕА-лазера возможно лишь в том случае, когда детектор закрыт обтюратором. Управление мощностью генераторов накачки *RF*, длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и автоподстройкой частоты излучения лазеров, синхронизация работы ослабителя *Att*, прерывателей *Ch1* и *Ch2*, обтюлятора *Obt*, а также формирование сигнала готовности лазерной системы производились контроллером через интерфейс RS485.

Выбор рабочей точки на контуре усиления CO<sub>2</sub>-лазеров и достижение одночастотного режима генерации являлись главными задачами контроллера

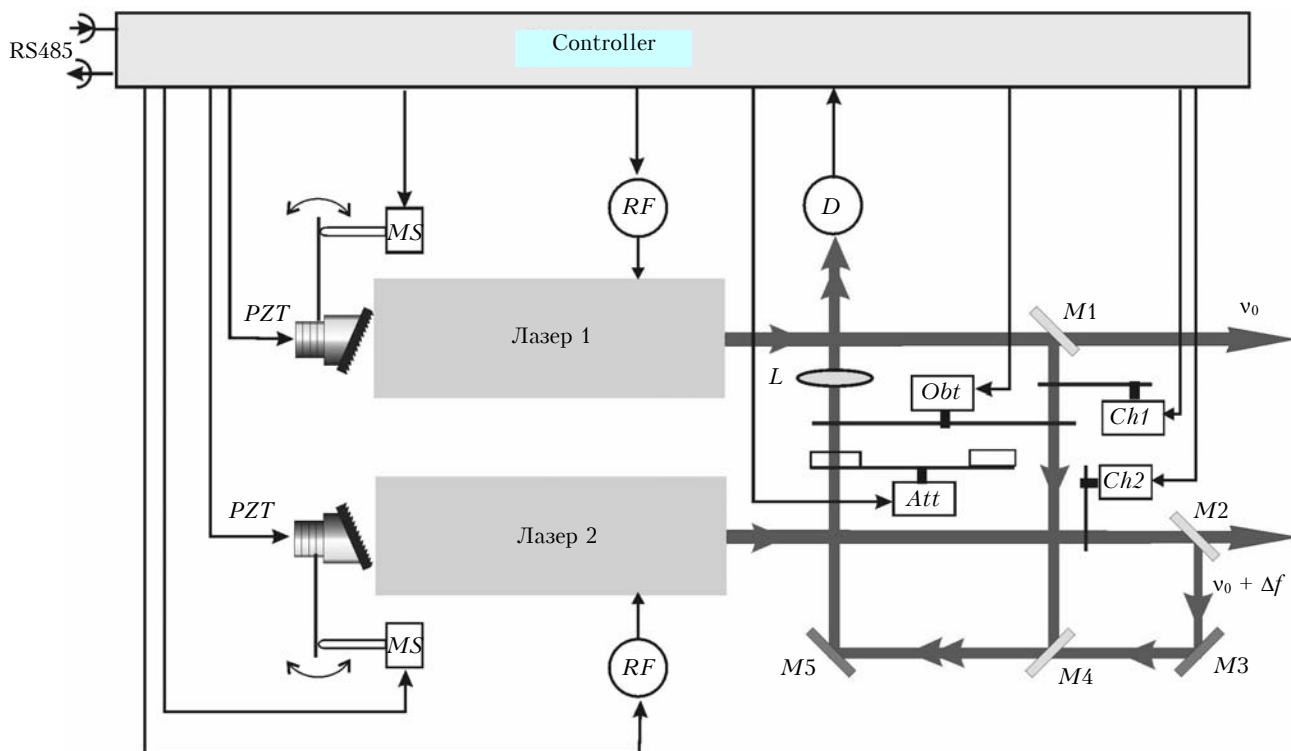


Рис. 6. Оптическая блок-схема двухканальной CO<sub>2</sub> лазерной системы

двухканальной  $\text{CO}_2$  лазерной системы. Для предварительного анализа контура усиления использовано независимое сканирование непрерывной мощности излучения, а также мощности высокочастотных (модовых) биений для каждого из лазеров. В этом случае прерыватели *Ch1* и *Ch2* закрывали один из лазерных пучков. Рабочая точка лазеров определялась как максимум контура усиления при условии отсутствия модовых биений.

В гетеродинной схеме лазеры должны работать на одной длине волны с определенной отстройкой друг от друга. В этом случае в обоих лазерах осуществлялись предварительное сканирование контура излучения и установка рабочей точки, а затем запускался алгоритм частотной автоподстройки (ЧАП) отстройки частоты одного из лазеров. ЧАП запускался во время открытого состояния обтюлятора. При достижении заданной частоты отстройки лазеров (20 МГц) схема переводилась в режим удержания и формировался сигнал готовности.

Как уже отмечалось выше, лазеры трубчатой конструкции имеют высокую жесткость и слабо чувствительны к внешним механическим воздействиям. Эти свойства ярко проявились при исследовании работы лазеров совместно с системами АПЧ (автоподстройка частоты) и ЧАП в реальных условиях. Оптическая схема лазерной установки позволяла наблюдать на экране осциллографа сигнал биений (0,1–30 МГц) между частотами излучения обоих лазеров, когда они работали на одной длине волны. После прогрева в течение 15–20 мин лазеры выходили на рабочий режим, температурный дрейф резонаторов практически прекращался, а частота биений флуктуировала на величину  $\pm 1...3$  МГц за период времени 1...3 мин. При легком постукивании по корпусу одного из лазеров наблюдалась небольшая девиация частоты биений, а при прекращении возмущения на лазер картина оставалась стабильной в течение нескольких минут. Высокая пассивная стабильность резонаторов лазеров и их слабая чувствительность к внешним возмущениям существенно облегчили требования к системам АПЧ и ЧАП.

Конструктивно разработанная двухканальная  $\text{CO}_2$  лазерная система выполнена в виде лазерного моноблока, внешний вид которого представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид двухканальной  $\text{CO}_2$  лазерной системы

Моноблок имеет габаритные размеры 1000×230×230 мм, массу около 50 кг, электрическое питание + 24 В от внешнего источника питания (использован источник питания модели PSP-1000-27

«Meanwell»), потребляемая мощность до 800 ВА, водяное охлаждение (~ 2 л/мин). Лазерные пучки выводятся из моноблока через два отверстия в передней панели, высота пучков над основанием ( $75 \pm 1$ ) мм, расстояние между пучками ( $100 \pm 1$ ) мм, непараллельность пучков не более 1 мрад. Поляризация излучения – линейная, вертикальная. Остальные параметры излучения лазеров соответствуют табл. 3.

Разработанная двухканальная  $\text{CO}_2$  лазерная система использована в составе мобильного гетеродинного ДП-лидара, подобного [8], который был изготовлен в «НПП Лазерные системы» (г. Санкт-Петербург) [17–19]. Двухканальная  $\text{CO}_2$  лазерная система прошла испытания в полевых условиях и показала удовлетворительные результаты. К настоящему времени в «НПП Лазерные системы» уже смонтированы и поставлены заказчикам несколько мобильных лидарных комплексов, в состав которых вошли описанные в настоящей работе двухканальные  $\text{CO}_2$  лазерные системы.

Другим интересным вариантом применения разработанной двухканальной  $\text{CO}_2$  лазерной системы является ее использование в составе трассового газоанализатора ДП прямого детектирования с дальностью зондирования атмосферы около 1 км при работе по диффузным топикишениям. В этом случае лазеры должны работать на разных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в соответствии с методом ДП, а частота излучения каждого лазера устанавливается на центр линии выбранного перехода.

## Заключение

Разработан перестраиваемый волноводный  $\text{CO}_2$ -лазер с ВЧ-накачкой, предназначенный для работы в гетеродинных системах. Лазер излучал на более чем 70 линиях при мощности генерации до 2,5–3 Вт на сильных линиях и до 0,3–0,5 Вт на слабых. Трубчатая конструкция лазера обеспечила высокую пассивную стабильность резонатора и слабую чувствительность к внешним возмущениям. Путем оптимизации оптической схемы волноводного резонатора удалось подавить паразитные модовые биения и добиться одномодового одночастотного излучения лазера, пригодного для использования в гетеродинных системах.

На основе двух перестраиваемых волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров разработана двухканальная лазерная система, предназначенная для работы в составе мобильного гетеродинного лидара дифференциального поглощения. Электронный блок (АПЧ–ЧАП) лазерной системы позволял устанавливать частоты лазеров на центры выбранных линий излучения или синхронизировать частоты лазеров при работе на одной длине волны. Управление мощностью излучения, длиной волны и автоподстройкой частоты излучения лазеров и синхронизация работы оптико-механических элементов лазерной системы производились контроллером через интерфейс RS485.

Несколько экземпляров двухканальной  $\text{CO}_2$  лазерной системы прошли испытания в полевых условиях в составе мобильного гетеродинного ДП-лидара, изготовленного в «НПП Лазерные системы»

(г. Санкт-Петербург) и показали удовлетворительные результаты. Разработанная двухканальная CO<sub>2</sub> лазерная система может быть использована как двухчастотный источник стабилизированного излучения в составе трассового газоанализатора ДП прямого детектирования.

1. *Byer R.L.* Remote air pollution measurement // Opt. and Quantum. Electron. 1975. V. 7. N 3. P. 147–177.
2. *Зуев В.В., Катаев М.Ю., Макогон М.М., Мицель А.А.* Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние проблемы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1136–1164.
3. *Zanzottera E.* Differential absorption lidar techniques in the determination of trace pollutants and physical parameters of the atmosphere // Critical Rev. in Analytical Chem. 1990. V. 21. N 4. P. 279–319.
4. *Wolf J.P., Douard M., Fritzsche K., Rairoux P., Schubert G., Ulbricht M., Weidauer D., Woste L.* 3D-monitoring of air pollution using «all solid state» lidar systems // Proc. SPIE. 1993. V. 2112. P. 147–158.
5. *Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д.* Лазерное зондирование средней атмосферы / Под общ. ред. чл.-кор. РАН В.В. Зуева. Томск: «ООО Издательство «РАСКО»», 2002. 352 с.
6. *Справочник по инфракрасной технике* / Ред. У. Вольф, Г. Цисс. В 4 т. Т. 3. Приборная база ИК-систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 472 с.
7. *Мензис Р.Т.* Лазерные методы гетеродинамирования // Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
8. *Menzies R.T., Tratt D.M.* Airborne CO<sub>2</sub> coherent lidar for measurements of atmospheric aerosol and cloud backscatter // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 24. P. 5698–5711.
9. *Mirzaev A.T., Sharakhimov M.Sh.* An RF-excited high-stable compact CO<sub>2</sub> laser // Sov. Quantum Electron. 1984. V. 11. N 6 (144). P. 1236–1241.
10. *Hochuli U.E., Haldemann P.R.* Life problems of DC and RF-excited low-power CW CO<sub>2</sub> waveguide lasers // Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. N 9. P. 2238–2241.
11. *Abrams R.* Coupling losses in hollow waveguide laser resonators // Quantum. Electron. 1972. V. 8. N 11. P. 838–843.
12. *Degnan J.J.* The waveguide laser: A Review // Appl. Phys. 1976. N 11. P. 1–33.
13. *Degnan J., Hall D.* Finite-aperture waveguide-laser resonators // Quantum. Electron. 1972. V. 8. N 11. P. 901–910.
14. *Справочник по лазерам* / Под ред. акад. А.М. Прохорова. В 2 т. Том II. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
15. *Вумтман В.* CO<sub>2</sub>-лазер / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 360 с.
16. *Hill C.A., Jackson P.E.* Hooting modes in a CO<sub>2</sub> waveguide lasers // IEEE. J. Quantum. Electron. 1988. V. 24. N 10. P. 1976–1980.
17. *Boreysho A.S., Morozov A.V., Savin A.V., Chakchir S.Ya.* Mobile multi-functional ecological lidar system based on heterodyne CO<sub>2</sub> differential absorption lidar and universal short-wave laser system // XI Joint Intern. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2004. P. 141.
18. *Boreysho A.S., Konyayev M.A., Savin A.V., Trilis A.V., Chakchir S.Ya., Karapuzikov A.I., Sherstov I.V.* Transmitting-receiving optical circuit of heterodyne CO<sub>2</sub> lidar // XI Joint Intern. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2004. P. 141.
19. *Sherstov I.V., Bychkov K.V., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Spitsin V.V., Chernikov S.B.* Two-channel CO<sub>2</sub> laser system for heterodyne lidar // XI Joint Intern. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2004. P. 141–142.

*I.V. Sherstov, K.V. Bychkov, V.A. Vasiliev, A.I. Karapuzikov, V.V. Spitsin, S.B. Chernikov.* **Two-channel CO<sub>2</sub> laser system for heterodyne lidar.**

The tunable waveguide RF-excited CO<sub>2</sub> laser is developed. Hooting modes are suppressed by optimization of the optical scheme of a waveguide cavity. The laser radiated at more than 70 lines with output of 0.3–3 W in single-mode and single-frequency regime. On the basis of two such lasers, the two-channel CO<sub>2</sub> laser system controlled by computer is developed, that is intended to operate in mobile heterodyne differential absorption lidar (DIAL). The laser frequencies can be stabilized at the centers of lines or synchronized with required frequency interval. The laser system was tested under field conditions in mobile heterodyne differential absorption lidar and has shown satisfactory results. The developed laser system can be used as a stabilized double-frequency source of radiation in column content gas analyzer with direct detection.