

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ СЕРИИ LCD И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

В работе впервые рассмотрено влияние различных факторов на стабильность характеристик компактных волноводных CO_2 -лазеров серии LCD, выпускаемых АО «Плазма» (Россия). Установлено, что угловые разъюстировки зеркал резонатора являются основной причиной относительной нестабильности излучения лазеров в частотном диапазоне 0 – 0,5 Гц. Лазеры работают при ВЧ-возбуждении и обладают выходной мощностью от 3 до 50 Вт в неселективном режиме генерации; они могут работать на фиксированной длине волны излучения или в режиме перестройки длины волны. Динамическое управление спектром излучения этих лазеров может осуществляться в автоматическом режиме по заданной программе с управлением встроенным сервоприводом от персонального компьютера. Лазеры серии LCD могут использоваться в системах мониторинга окружающей среды, а также в лидарах.

ВОЛНОВОДНЫЙ CO_2 -ЛАЗЕР, ЗЕРКАЛО РЕЗОНАТОРА, ВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЕ, ГЕТЕРОДИННЫЙ ЛИДАР, НЕСТАБИЛЬНОСТЬ МОЩНОСТИ.

Введение

Волноводные молекулярные CO_2 -лазеры широко применяются в промышленности, связи, экологии, медицине, военной технике и научных исследованиях. В связи с этим к ним предъявляются требования высокой надежности, стабильности выходных параметров, экономичности, малых габаритов. В открытом акционерном обществе «Плазма» [1] разработаны волноводные CO_2 -лазеры с высокочастотным (ВЧ) возбуждением (серия LCD – Laser (based on) Carbon Dioxide, т. е. лазер на двуокиси углерода), с выходной мощностью от 3 до 50 Вт в неселективном режиме генерации. При работе на фиксированной длине волны мощность генерации варьируется от 1 до 30 Вт. Переключаемые по длинам волн волноводные лазеры имеют мощность излучения 5, 10 Вт на наиболее интенсивных линиях 9R-,

9P-, 10R- и 10P- ветвей. Общее количество линий составляет от 60 до 80.

Цель настоящей работы – анализ выходных характеристик волноводных CO_2 -лазеров серии LCD для выработки рекомендаций по перспективным направлениям их использования.

Характеристики волноводных CO_2 -лазеров серии LCD

Во всех приборах серии LCD заложены единые конструкторские и технологические решения [2]:

оптический волноводный резонатор U-образной складной конструкции;

металлокерамическая разрядная структура, обеспечивающая отвод тепла от разряда на внешнюю поверхность прибора, и симметричность конструкции, гарантирующие стабильность параметров излучения;

возбуждение высокочастотного разряда по схеме с одним центральным и двумя заземленными электродами, обеспечивающее малое межосевое расстояние между каналами;

оптический узел поворотных зеркал, обладающий малыми оптическими потерями и исключающий разъюстировку при работе излучателя в условиях жестких механоклиматических воздействий;

рациональная технология сборки разрядной структуры, обеспечивающая ее надежную фиксацию в корпусе резонатора;

современная технология термовакуумной обработки, обеспечивающая требуемые параметры надежности в условиях серийного производства.

Приведем стандартный набор характеристик волноводных CO_2 -лазеров серии LCD:

мощность лазерного излучения — от 3 до 50 Вт (варьируется за счет изменения протяженности усиливающей среды, а соответственно, и длины излучателя);

нестабильность мощности излучения находится в пределах 3 — 5 %;

распределение интенсивности в поперечном сечении пучка излучения — гауссоподобное (90 %-й эквивалент моды TEM_{00} , $M^2 \leq 1,1 - 1,2$);

диапазон перестройки по длине волны излучения — 9,2 — 10,8 мкм (может быть расширен при использовании изотопов молекулы CO_2);

кратковременная нестабильность частоты излучения — не хуже $5 \cdot 10^{-9}$ отн. ед.

Приборы работают в отпаянном режиме при типичном составе рабочей газовой смеси $\text{CO}_2 : \text{CO} : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe}$, они устойчивы к механоклиматическим воздействиям по четвертой группе жесткости. В лазерах серии LCD используется ВЧ-возбуждение на рабочей частоте 81,36 МГц. Данное значение частоты является оптимальным для используемых разрядных структур с поперечным сечением 2,0 — 2,8 мм, поскольку приэлектродные слои значительно уже разрядного промежутка, а дальнейшее увеличение частоты приводит к проблеме продольной неоднородности разряда [3].

Экспериментальные данные

Рассмотрим некоторые факторы, влияющие на параметры излучения. Наибольшая относительная нестабильность лазерного излучения регистрируется в диапазоне 0 — 0,5 Гц и связана, во-первых, с угловыми разъюстировками зеркал резонатора; во-вторых, тепловые изменения длины резонатора приводят к смещению частоты генерации относительно контура усиления в активной среде. Это смещение приводит к изменению мощности генерации, причем чем короче резонатор, тем больше колебания мощности (рис. 1).

Для неволноводных лазеров, например типа ЛГ-74, ЛГН-901, давление рабочей газовой смеси составляет 20 — 30 Торр. В лазерах же типа LCD, по сравнению с неволноводными, давление рабочей газовой смеси гораздо выше: 100 Торр и более; соответственно, ширина контура усиления достигает примерно 500 МГц. Кроме того, для складных резонаторов частотный интервал между соседними продольными модами резонатора в два раза меньше, чем для линейных (при одинаковой базовой длине излучателей).

Сочетание двух указанных выше факторов позволяет достичь гораздо меньшей не-

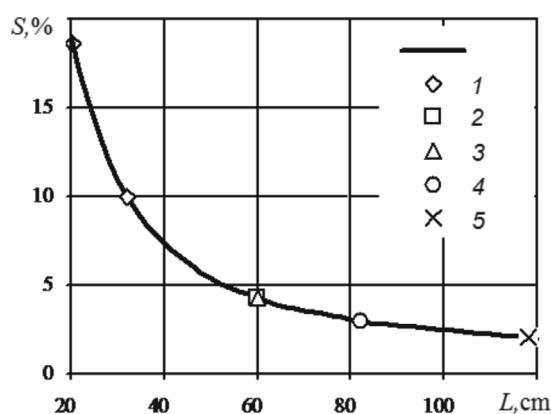


Рис. 1. Зависимость нестабильности мощности излучения разных волноводных CO_2 -лазеров, вызванной изменением их температуры, от длины резонатора. Экспериментальные точки представлены для лазеров марок LCD-X, где X = 1A,W (1), 5A (2), 10A,W (3), 15A,W (4), 25 (5)

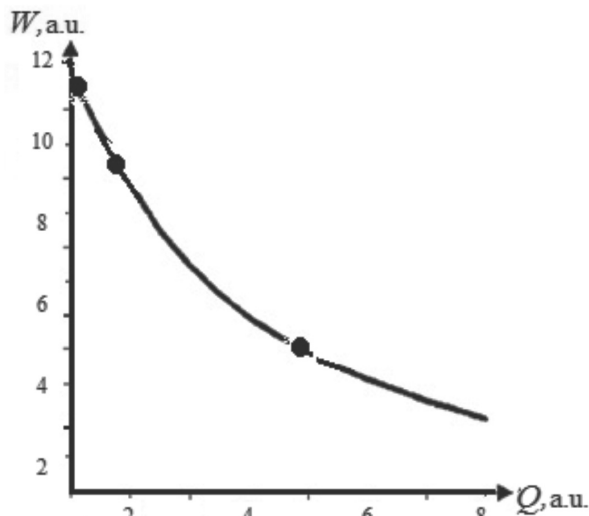


Рис. 2. Зависимость мощности излучения лазера LCD-10W от скважности управляющего сигнала на частоте модуляции 4 кГц

стабильности мощности излучения без применения специальных мер по стабилизации длины резонатора. К тому же волноводные лазеры менее критичны к разъюстировке оптических элементов, что также повышает стабильность выходных характеристик.

Определенный интерес для практических целей вызывает возможность модуляции мощности излучения за счет управления характеристиками высокочастотного емкостного разряда.

На рис. 2 приведена зависимость мощности лазерного излучения W от скважности Q управляющего сигнала на частоте модуляции 4 кГц.

На рис. 3 представлены формы импульса излучения при различных частотах управляющего сигнала при скважности $Q = 2$ (частота следования импульсов 2 и 5 кГц) и при $Q = 5$ (частота следования импульсов 10 кГц). Наборы параметров, представленные на рис. 3, это частота модуляции f_m , частота следования импульсов ν , длительность импульсов τ .

При параметрах запускающих импульсов, приведенных на рис. 3, наблюдается 100%-я модуляция мощности излучения. Для обеспечения такой модуляции на частотах следования импульсов выше 10 кГц необходимо увеличить скорость разруше-

ния верхних рабочих уровней молекулы CO_2 после снятия импульсов накачки. С этой целью повышают общее давление рабочей газовой смеси относительно оптимальных значений, относительную долю гелия в ней и др. Как правило, это приводит к снижению выходной мощности излучения.

Возможность непрерывной и дискретной перестройки частоты (длины волны) излучения волноводных CO_2 -лазеров реализуется за счет размещения дифракционной решетки в специальном оптическом узле [4, 5] и использования оптических резонаторов с выводом излучения в первый или нулевой порядки излучения. По желанию потребителей перестройка по длинам волн может осуществляться вручную с помощью микрометрического винта либо

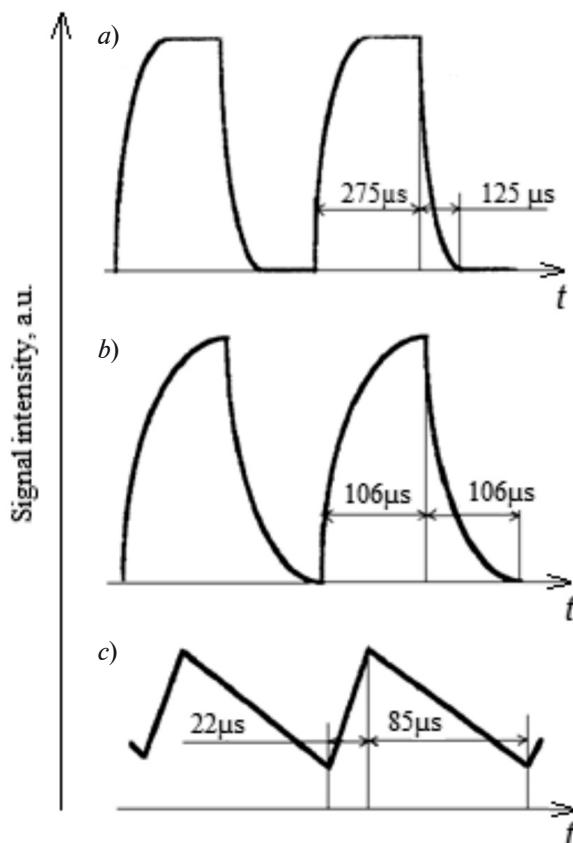


Рис. 3. Формы импульсов излучения лазера LCD-1A при различных наборах параметров управляющего сигнала: $f_m = \nu = 2$ кГц, $\tau = 250$ мкс (a); $f_m = \nu = 5$ кГц, $\tau = 100$ мкс (b); $f_m = \nu = 10$ кГц, $\tau = 19$ мкс (c); $Q = 2$ (a, b) и 5 (c)

в автоматическом режиме по заданной программе с управлением встроенным сервоприводом от персонального компьютера. В последнем случае скорость сканирования по всему диапазону не превышает единиц секунд (в зависимости от сложности алгоритма управления).

Применение волноводных CO₂-лазеров

При средствах обработки сигналов, организованных определенным образом, функции лазерных лидаров могут быть сделаны весьма гибкими [6]. Например, регистрация отраженного сигнала только на частоте, соответствующей доплеровскому сдвигу, позволяет выделить объекты, движущиеся с определенной скоростью, подавляя при этом отражения от неподвижных объектов. Если использовать «выборку» сигнала, соответствующую отражению от объектов на заданном расстоянии, то можно также исключить фоновые изображения предметов вне изучаемой зоны пространства. Острая направленность луча и достаточно малая длина волны позволяют добиваться высокого пространственного разрешения. С помощью лазерных лидаров обеспечивается наблюдение малоразмерных предметов, например проводов линий электропередач с борта самолета или вертолета, производящих полеты на малых высотах.

Измерение концентраций молекул, контроль примесей в атмосфере. Применение лазеров для газоанализа расширяется очень интенсивно и представляет сейчас достаточно развитое направление, отраженное во многих монографиях. Большие успехи достигнуты при использовании частотно-перестраиваемых лазеров в инфракрасной области спектра. За исключением сравнительно редких случаев, когда плотности молекул могут быть измерены по поглощению видимого света на переходах между различными электронными состояниями, для аналитических целей используются методы поглощения в инфракрасной области спектра на колебательно-вращательных переходах.

Ряд систем активной безопасности движущихся объектов (автомобили, самолеты и др.) основан на применении зондирую-

щих комплексов — лидаров. В датчиках подобного типа с помощью когерентного лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазонов определяется расстояние до находящегося впереди объекта (транспортного средства), а также его скорость. Лидарные комплексы могут использоваться для обнаружения, анализа состава и определения концентраций загрязняющих примесей (веществ) в атмосфере, в зонах транспортных магистралей различного назначения и др.

В качестве примера рассмотрим работу лазерного дальномера непрерывного действия с частотной модуляцией (рис. 4). Принцип его работы представлен на рис. 5. Излучение одного и того же лазера используется в качестве как опорного, так и зондирующего, что достигается расщеплением на фотоприемнике луча с последующим смещением опорного излучения с излучением, отраженным от объекта.

Сперва рассмотрим случай, когда объект неподвижен относительно радара (см. рис. 5). В интервале времени ΔT (от T_1 до T_m) частота F генерации лазера линейно меняется на величину ΔF от F_1 до F_m . Пусть время, необходимое для прохождения светом пути R от лидара до объекта и обратно, равно

$$\Delta t = T_2 - T_1 = 2 R/c.$$

За это время частота лазера изменится на величину $F_8 = F_2 - F_1$. Поэтому при смешении местного и отраженного излучений

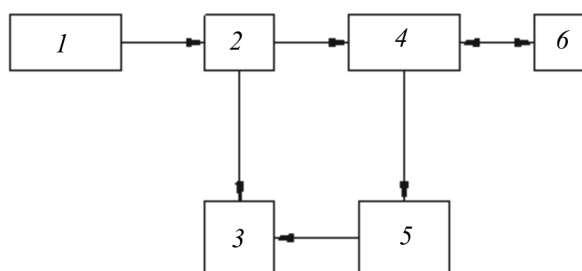


Рис. 4. Функциональная схема лазерного дальномера непрерывного действия:

1 — волноводный CO₂-лазер, 2 — схема расщепления, 3 — фотоприемное устройство, 4 — приемопередающая антенна, 5 — согласующее устройство, 6 — объект контроля

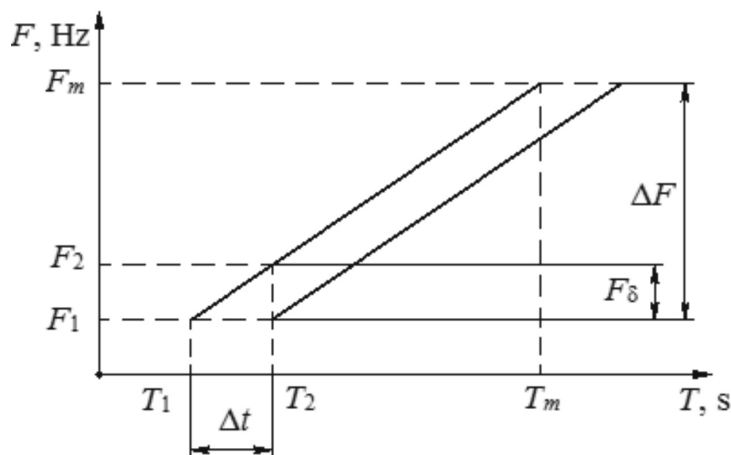


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип действия лазерного дальномера в непрерывном режиме (представлена динамика изменения частоты генерации лазера)

на нелинейном фотоприемнике возникают биения на частоте F_δ пропорционально расстоянию до объекта. Из рис. 5 видно, что $F_\delta = 2\Delta FR / cT_m$. Оценим погрешность измерения расстояния ΔR , связанную с конечной точностью определения частоты биений:

$$F_\delta \pm \delta = \frac{2 \cdot \Delta F}{c} \cdot \frac{R \pm \Delta R}{T_m}. \quad (1)$$

Уширение спектра биений возникает из-за конечного времени их регистрации, определяемого интервалом частотного сканирования. Пользуясь известными правилами перехода от временного к частотному описанию величин, величину δ можно определить как $\delta = T_m^{-1}$, откуда следует, что $\Delta R = c/2\Delta F$. Видно, что пространственное разрешение по лучу наблюдения определяется полосой частотной перестройки лазера. Отсюда и возникает интерес к применению в лидарах волноводных лазеров с их широким диапазоном непрерывной перестройки.

Перестройка лазерной частоты достигается сканированием длины резонатора с помощью одного из отражателей на пьезоэлементе, электродинамическом устройстве и т. п. Разумеется, необходимо обеспечить линейность сканирования или учесть соответствующую нелинейность при обработке сигнала.

Другое важное требование связано с частотной стабильностью лазера за короткие периоды времени. Характерный уровень стабильности, достаточный для применения в указанных целях, составляет для видимого диапазона примерно $10^{-10} - 10^{-11}$ при времени усреднения около $10^{-3} - 10^{-4}$ с; в инфракрасной же области достаточно стабильности порядка $10^{-9} - 10^{-10}$.

Одновременно с измерением расстояния та же система позволяет определять и скорость относительного движения объекта. Для этого используется пилообразная модуляция частоты лазера. Диаграмма соответствует сближению радара и объекта. Независимо от расстояния отраженный от объекта сигнал вследствие эффекта Доплера имеет частотный сдвиг F_D , который накладывается на сдвиг F_R , связанный с перестройкой частоты лазера за время двойного прохода светом расстояния от радара до объекта. На участке с возрастанием частоты генерации, частота биений будет составлять

$$F_{+\delta} = F_R - F_D$$

(на падающем участке $F_{-\delta} = F_R + F_D$).

Отсюда определяется доплеровский сдвиг и соответствующая ему скорость движения объекта.

Лазерный лидар гетеродинный. На рис. 6 представлена схема лазерного лидара на

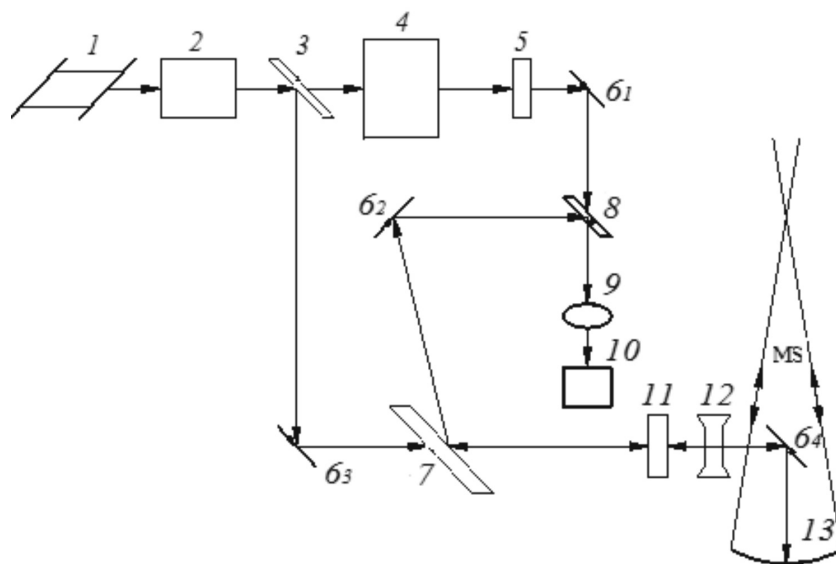


Рис. 6. Оптическая схема гетеродинного лидара:

1 – CO₂-лазер; 2 – двукратный телескоп; 3 – делительное зеркало; 4 – акустооптический модулятор; 5, 11 – пластины $\lambda/2$ и $\lambda/4$ соответственно; 6₁ – зеркала; 7 – брьюстеровская пластина; 8 – смесительное зеркало; 9, 10 – фотоприемное устройство и его линза; 11, 12, 13 – отрицательная линза антенны, ее плоское и сферическое зеркала соответственно; MS (measuring space) – область измерительного объема

основе волноводного CO₂-лазера.

Одномодовое излучение CO₂-лазера 1 линейно поляризовано, угол диаграммы направленности составляет примерно $1 \cdot 10^{-3}$ рад. Для уменьшения расходимости и улучшения качества пучка излучение направляется в телескоп 2, собранный по схеме Галилея из отрицательной и положительной линз. Линзы выполнены из ИК-прозрачных материалов (ZnSe, AsGa, Ge и др.) с нанесением на рабочие поверхности специальных просветляющих покрытий в области 10,6 мкм. После телескопа 2 излучение расщепляется на клиновидной пластине 3 на зондирующий и опорный пучки в соотношении примерно 20:1. Деление пучка происходит на рабочей поверхности пластины, подбор коэффициента деления осуществляется нанесением соответствующего покрытия. Вторая, «нерабочая», сторона пластины просветлена на длину волны 10,6 мкм. Клиновидность пластины обеспечивает устранение (увод в сторону) паразитных переотражений. Опорный пучок проходит через оптический клин и попадает в акустооптический модулятор 4. Последний представляет собой германиевый

монокристалл с наклеенным на него пьезокорректором. Поскольку пьезоэлемент создает частичное уплотнение среды, формируется частичная дифракция лазерного пучка. Плоскость его поляризации параллельна большой оси кристалла. Угол падения на боковую грань кристалла равен $2,2^\circ$ относительно оптической оси. Благодаря геометрии кристалла, выходящий луч также составляет угол $2,2^\circ$ относительно той же оси. Подводимая к элементу мощность имеет порядок в единицы ватт.

Частота управляющего напряжения выбирается из диапазона 20 – 50 МГц. После акустооптического модулятора 4 излучение приобретает соответствующий частотный сдвиг, проходит пластину 5 (из селенида цинка), которая сдвигает фазу излучения на $\lambda/2$ и делает излучение s-поляризованным. Это преобразование необходимо для согласования пучка с зондирующим пучком, возвращенным из атмосферы. После пластины 5 излучение попадает на смесительное зеркало 8.

В свою очередь, зондирующее p-поляризованное излучение (оно составляет примерно 90 – 95 % от общей мощ-

ности лазерного излучения) направляется зеркалом b_3 на поляризационную развязку, в качестве которой используется пластина 7 (из германия), расположенная под углом Брюстера (примерно 76°). После развязки 7 излучение поступает на пластину 11 ($\lambda/4$, из селенида цинка), которая преобразует линейно-поляризованное излучение в излучение с круговой поляризацией.

Формирование каустики измерительного объема (MS) осуществляется антенной системой. Антенна формируется из отрицательной линзы 12 с узлом перефокусировки. Зеркало b_4 поворачивает пучок на 90° и направляет его в сферическое зеркало 13, которое формирует в пространстве измерительный объем MS.

Скорость движения частиц в измерительном объеме равна скорости ветра. Фотоприемное устройство регистрирует соответствующую частоту перемещения интерференционных полос F_{sum} :

$$F_{sum} = F_{АОМ} + F_{VETRA}, \quad (2)$$

где $F_{АОМ} = 40$ МГц;

$$F_{VETRA} = \frac{2 \cdot v \cdot V_v}{c}, \quad (3)$$

где $v = 200$ МГц; V_v , c (м/с) – скорости ветра и света.

Сигнал частотой F_{sum} с выхода фотоприемного устройства поступает в радиотехническую часть схемы, где вычисляется скорость перемещения контролируемого объекта (ветер, автомобиль и пр.).

Заключение

В данной работе мы проанализировали возможные применения лазеров LCD для целей экомониторинга, исследовали их спектральные характеристики, оценили влияние внешних воздействий на стабильность спектра и уровень шумов лазерного излучения. На основе полученных данных выработаны рекомендации по применению этих лазеров в оптических схемах систем контроля экологической обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Сайт фирмы АО «Плазма». Режим доступа: <http://www.plasmalabs.ru/> (дата обращения 30.07. 2016).

[2] Cherezov V.M., Kyun V.V., Payurov A.Ya., Samorodov V.G., Shishkanov F.F., Sipaylo A.A. Parametrical line of RF-excited waveguide CO₂ lasers // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4165. Pp. 150–156.

[3] Hall D.R., Hill C.A. Radio frequency discharge excited CO₂ lasers // Handbook of Molecular Laser. Ed. P.K. Cheo, Marsel Bakker, 1987.

[4] Кюн В.В., Паюров А.Я., Сипайло А.А.,

Шлыкova С.П. Перестраиваемый лазер. Патент 2244368. Российская Федерация. МПК7 Н 01 S3/1055; заявитель и патентообладатель ОА «Плазма» № 2003117310/28; заявл.09.06.03; опубл. 10.01.05.

[5] Кюн В.В., Паюров А.Я., Сипайло А.А. Перестраиваемый лазер. Патент 60795. Российская Федерация. МПК7 H01S 3/13.; заявитель и патентообладатель ОА «Плазма» № 2006131845/22; заявл.05.09.06; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

[6] Очкин В.Н. Волноводные газовые лазеры. М.: Изд-во «Знание», 1988.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАЮРОВ Александр Яковлевич – старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
mera@plasmalabs.ru

БОДРОВ Александр Иванович – технический директор АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
sales@plasmalabs.ru

КЮН Валерий Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор центра АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
kvazar@plasmalabs.ru

СИПАЙЛО Алексей Антонович – старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
grp@plasmalabs.ru

ШИШКАНОВ Евгений Федорович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
mera@plasmalabs.ru

Payurov A.Ya., Bodrov A.I., Kyun V.V., Sipaylo A.A., Shishkanov E.F. HOME-PRODUCED WAVEGUIDE LASERS OF THE LCD SERIES AND SOME FEATURES OF THEIR APPLICATION.

The influence of various factors on stability of the performance data of compact CO₂ waveguide lasers (the LCD series) produced by Plasma JSC in Russia has been considered for the first time. An angular misalignment of cavity mirrors was found to be the main reason for the relative instability of the laser emission in the frequency range of 0 – 0.5 Hz. These lasers work under RF excitation and have a power output from 3 to 50 W in a non-selective oscillating mode. Lasers can work at the fixed emission wavelength or in the wavelength-change mode. Preprogrammed dynamic control of the laser's emission spectrum can be carried out in the automatic mode using the built-in servo-driver from the personal computer. The CO₂ waveguide lasers of the LCD series can be used in laser lidar systems, particularly, for observation of small-sized objects and monitoring of the environment.

CO₂ WAVEGUIDE LASER, CAVITY MIRROR, RF EXCITATION, LIDAR, LCD SERIES.

REFERENCES

- [1] The site of the joint-stock company "Plazma". URL: <http://www.plasmalabs.ru/> (the last accessed date is 30.07.2016).
- [2] V.M. Cherezov, V.V. Kyun, A.Ya. Payurov, et al., Parametrical line of RF-excited waveguide CO₂ lasers, Proc. SPIE. 4165 (2000) 150–156.
- [3] D.R. Hall, C.A. Hill, Radio frequency discharge excited CO₂ lasers, In: Handbook of Molecular Laser, Ed. P.K. Cheo, Marsel Bakker (1987).
- [4] V.V. Kyun, A.Ya. Payurov, A.A. Sipaylo, Perestraivayemyy lazer [Tunable laser], Patent 60795 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H01S 3/13.; zayavitel i patentoobladatel OA "Plazma" № 2006131845/22 ; zayavl.05.09.06; opubl. 27.01.2007, Byul. № 3.
- [5] V.V. Kyun, A.Ya. Payurov, A.A. Sipaylo, S.P. Shlykova, Perestraivayemyy lazer [Tunable laser], Patent 2244368 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H 01 S3/1055.; zayavitel i patentoobladatel OA "Plazma" No. 2003117310/28; zayavl.09.06.03; opubl. 10.01.05.
- [6] V.N. Ochkin, Volnovodnyye gazovyye lazery [Waveguide gas lasers], Izd-vo "Znaniye", Moscow, 1988.

THE AUTHORS

PAYUROV Aleksander Ya.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
mera@plasmalabs.ru

BODROV Aleksander I.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
sales@plasmalabs.ru

KYUN Valeriy V.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation
kvazar@plasmalabs.ru

SIPAYLO Aleksey A.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation

grp@plasmalabs.ru

SHISHKANOV Eugeny F.

Joint-stock company "Plasma"

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation

mera@plasmalabs.ru