

Автоматизированная настройка CO₂-лазера на заданную линию генерации без спектрального прибора

В.О.Петухов, В.А.Горобец

Предложена методика поиска заданной линии генерации без спектрального прибора на основе совпадения частот переходов, принадлежащих разным колебательно-вращательным полосам молекулы CO₂. Это совпадение приводит к аномалии в распределении усиления по вращательным подуровням и соответственно сказывается на выходных параметрах лазера. Данная методика успешно реализована для полностью автоматизированного непрерывного CO₂-лазера низкого давления с продольным разрядом и импульсного ТЕА CO₂-лазера.

Ключевые слова: CO₂-лазер, настройка на линию, аномальное усиление, совпадение линий.

При использовании перестраиваемых CO₂-лазеров для решения многих прикладных задач, например в спектроскопии и газоанализе, важно обеспечить быструю и надежную настройку лазера строго на заданную линию генерации. Обычно настройка лазера на выбранную линию проводится с использованием внешнего спектрального прибора (монокроматора, анализатора спектра и т.д.). В ряде работ (см., напр., [1]) для этой цели использовалась ячейка с резонансно-поглощающим на известных линиях газом. Однако применение таких дополнительных устройств значительно усложняет лазерную систему и затрудняет автоматизацию процесса настройки на выбранную линию генерации.

В данной работе предложена оригинальная методика поиска необходимой линии генерации и описан полностью автоматизированный процесс настройки перестраиваемого CO₂-лазера на выбранную линию без применения дополнительных спектральных устройств. В основу методики положен известный факт случайного совпадения частот переходов, принадлежащих разным колебательно-вращательным полосам молекулы CO₂ (см., напр., [2, 3]). Это совпадение приводит к аномалии в распределении усиления по вращательным подуровням. Для настройки лазера на необходимую длину волны генерации предлагается использовать подобные аномальные линии в качестве реперных. При этом целесообразно выбирать линии с высокой степенью аномальности по усилению в определенных участках спектра, например на краях полос, где эти линии могут быть надежно выделены, особенно при автоматизированной настройке.

Отработка методики проводилась на непрерывном CO₂-лазере низкого давления с продольным разрядом (длина активной среды $L \sim 1$ м) и импульсном ТЕА CO₂-лазере с УФ предыонизацией ($L \sim 0.7$ м). В обоих лазерах (рис.1) перестройка по длинам волн осуществлялась по-

воротом дифракционной решетки, закрепленной в специально разработанном прецизионном электромеханическом устройстве на основе шагового двигателя, управляемом от персонального компьютера. Подробное описание такого устройства и конструктивных особенностей используемых CO₂-лазеров можно найти в работах [4, 5].

Рассмотрим более детально методику настройки на линию генерации без спектрального прибора на примере полностью автоматизированного CO₂-лазера низкого давления с продольным разрядом. В этом лазере в качестве активного элемента используется серийная отпаянная газоразрядная трубка (ГЛ-501), охлаждаемая проточной водой. Резонатор лазера образован встроенным в трубку глухим зеркалом с радиусом кривизны ~ 3 м и плоской дифракционной решеткой 150 штр./мм, размещенной в узле поворота. Решетка работает по автоколлимационной схеме в первом порядке дифракции (коэффициент отражения $\sim 95\%$). Конструкция узла поворота дифракционной решетки предусматривает размещение вспомогательного отражающего зеркала, которое образует вместе с решеткой двугранный отражатель [6], что дает возможность обеспечивать постоянство направления выходного излучения при перестройке по лазерным линиям. Для получения индикаторного сигнала генерации лазерного излучения, необходимого для полной автоматизации процесса перестройки лазера, используется пироприемник МГ-30, на который попадает слабое излучение, отраженное от окна газоразрядной трубки (рис.1).

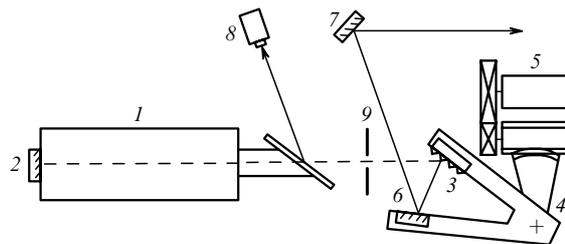


Рис.1. Оптическая схема перестраиваемого CO₂-лазера: 1 – активный элемент; 2 – глухое зеркало; 3 – дифракционная решетка; 4 – узел поворота; 5 – шаговый двигатель; 6 – вспомогательное зеркало; 7 – поворотное зеркало; 8 – фотоприемник; 9 – диафрагма.

В.О.Петухов, В.А.Горобец. Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И.Степанова» НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Ф.Скарины, 68; e-mail: v.petukhov@ifanbel.bas-net.by

Поступила в редакцию 12 июля 2004 г., после доработки – 5 ноября 2004 г.

Перестройка по линиям генерации осуществляется поворотом дифракционной решетки относительно оптической оси резонатора. Узел поворота обеспечивает точность углового позиционирования решетки не хуже $10''$ [4]. Для установки привода строго в начальное (нулевое) положение был специально разработан датчик нулевого положения, который обеспечивает высокую точность и воспроизводимость привязки начального положения узла поворота, равную шагу перестройки [4]. Заметим, что ошибка в 1 шаг не влияет на точность установки решетки на выбранную линию, поскольку угловое расстояние между соседними линиями с учетом дисперсии дифракционной решетки, как правило, составляет $\sim 350''$ (что эквивалентно 90 шагам двигателя).

Система перестройки длины волны генерации работает совместно с персональным компьютером, для которого разработано интерфейсное устройство и необходимое программное обеспечение. В память компьютера предварительно заносятся углы поворота дифракционной решетки относительно оптической оси резонатора, соответствующие каждой линии генерации. Углы поворота, выраженные в шагах двигателя, рассчитываются при этом по известной дисперсии используемой дифракционной решетки.

При работе лазера теоретически рассчитанные углы поворота дифракционной решетки могут несколько отличаться от реальных значений на некоторую постоянную величину. Такое отличие, прежде всего, связано с произвольностью выставления нулевого датчика угла поворота. Вместе с тем даже при учете такой произвольности указанное отличие может возникнуть, например, из-за изменения показателя преломления активной среды вследствие небольшого варьирования ее химического состава в условиях электрического разряда. Однако при этом спектральные интервалы между генерируемыми линиями, а значит и относительное угловое расстояние между соответствующими им положениями дифракционной решетки, не изменяются. Поэтому целесообразно найти экспериментальную поправку к рассчитанным угловым положениям дифракционной решетки, выраженную в шагах двигателя относительно положения, задаваемого нулевым датчиком. Эта поправка будет одинаковой для всех линий генерации.

Программа управления перестройкой лазера по спектру предусматривает возможность полуавтоматического режима определения такой поправки с использованием внешнего спектрального прибора. При этом определяется угловое положение дифракционной решетки для выбранной в качестве реперной линии генерации, а возможное различие между этим положением и соответствующим теоретическим значением заносится в память компьютера как искомая экспериментальная поправка. Такая процедура позволяет провести калибровку системы перестройки лазера по спектру и ее метрологическую аттестацию.

Рассмотрим теперь полностью автоматизированный режим управления перестройкой лазера без использования спектрального прибора. В этом случае поправка определяется по линии с аномальной мощностью генерации, позволяющей надежно идентифицировать ее в спектре выходного излучения. В качестве такой линии целесообразно использовать линию P(56) полосы $00^01 - 10^00$, практически полностью совпадающую с линией P(23) полосы $01^11 - 11^10$ ($\Delta\nu \sim 40$ МГц) [7]. Рассмотрим алго-

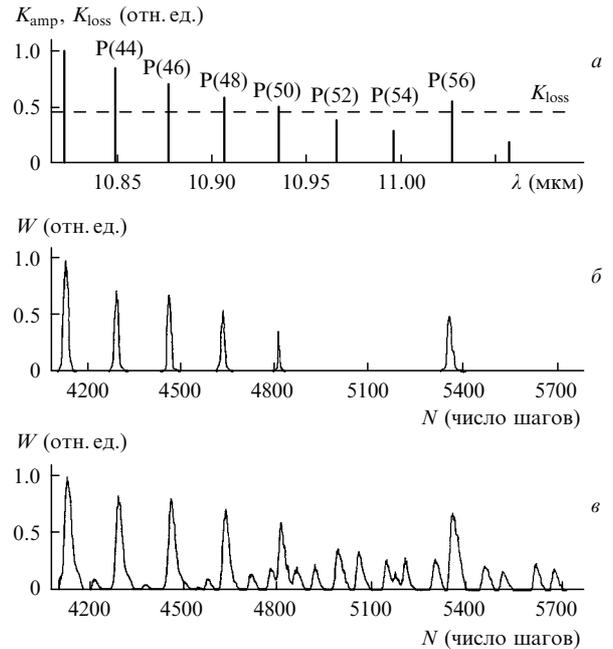


Рис.2. Коэффициенты усиления P-ветви полосы $00^01 - 10^00$ (а), а также спектры генерации лазера в режиме поиска реперной линии (б) и в рабочем режиме (в).

ритм автоматического поиска этой линии. На рис.2,а приведены коэффициенты усиления для линий генерации длинноволнового края P-ветви полосы $00^01 - 10^00$, полученные следующим образом.

Вначале на достаточно интенсивной лазерной линии P(42) проводились точные измерения коэффициента усиления в разрядной трубке методом зондирования активной среды слабым сигналом. В качестве источника зондирующего излучения использовался непрерывный CO_2 -лазер, перестраиваемый по колебательно-вращательным линиям со стабилизированными выходными параметрами. Зондирующий лазер и методика измерений описаны в работах [4, 8]. Коэффициенты усиления более слабых линий с вращательным квантовым числом $J > 42$ (погрешность измерения на которых значительно больше, чем на линии P(42)) определялись из точно измеренного значения коэффициента усиления на линии P(42) по хорошо известной расчетной зависимости, связывающей коэффициент усиления с номером колебательно-вращательной линии [9]. При этом необходимая для данной процедуры поступательная температура активной среды экспериментально определялась по методике работы [8]. Для линии P(56) учитывался также вклад контура усиления линии P(23) полосы $01^11 - 11^10$.

Из рис.2,а видно, что линия P(56) полосы $00^01 - 10^00$ имеет аномальный коэффициент усиления, сравнимый с коэффициентом усиления для линии P(48), а также существенно меньшие коэффициенты усиления близкорасположенных к ней линий P(50), P(52), P(54) и P(58). Следовательно, при соответствующем подборе коэффициента потерь резонатора (что реализуется варьированием тока разряда или изменением диаметра внутррезонаторной диафрагмы) в спектре будет присутствовать только линия P(56), а другие близкорасположенные линии генерировать не будут.

Процедура нахождения реперной линии выглядит следующим образом. Дифракционная решетка устанавливается в положение, соответствующее краю длинно-

волновой части спектра, где заведомо нет генерирующих линий. Затем осуществляется последовательная перестройка в коротковолновую сторону. При этом спектральный интервал между генерирующими линиями контролируется по относительному изменению положения поворотного узла дифракционной решетки. Такую перестройку целесообразно повторять несколько раз, изменяя при этом (за счет варьирования тока разряда или диаметра диафрагмы) разность коэффициентов усиления и потерь. Реперная линия считается найденной после достижения спектрального интервала между генерируемыми линиями (крайней в длинноволновой стороне спектра линией-репером и предшествующей ей линией), равного нескольким спектральным промежуткам между соседними линиями в этой области спектра. Применение указанного критерия основано на известном факте квазиэквилидистантного расположения генерирующих линий в пределах одной ветви. Появление двукратного и более спектрального интервала между крайними генерирующими линиями происходит лишь в том случае, когда варьированием разности коэффициентов усиления и потерь можно добиться генерации в длинноволновой области спектра на одной из пар линий полосы 00⁰1 – 10⁰0 (P(48) и P(56), P(50) и P(56), P(52) и P(56)) при отсутствии генерации на линиях, расположенных между этими парами и после линии P(56).

Отметим, что такая процедура нахождения реперной линии обеспечивает ее надежную идентификацию и может быть использована для всех CO₂-лазеров, способных генерировать в длинноволновой области спектра до линии P(48) полосы 00⁰1 – 10⁰0 включительно. Процесс поиска реперной линии осуществлялся автоматически по разработанной программе (рис.3).

Для используемой лазерной системы стабильный режим генерации на линиях P(56) и P(48) без генерации соседних линий имел место при диаметре диафрагмы 7 мм и токе разряда 30 мА (рис.2,б). Получение четырехкратного спектрального интервала между крайними генерирующими линиями (~ 450 шагов двигателя) однозначно



Рис.3. Схема алгоритма нахождения экспериментальной поправки.

свидетельствовало о выполнении критерия нарушения эквидистантности линий генерации и позволяло надежно идентифицировать крайнюю генерирующую линию как реперную линию P(56) полосы 00⁰1 – 10⁰0. Положение привода, выраженное в шагах двигателя, относительно положения, задаваемого нулевым датчиком, которое соответствует этой линии, заносилось в память компьютера как положение репера.

После идентификации реперной линии осуществлялась автоматизированная настройка на любую заданную линию генерации по рассчитанным с учетом известной дисперсии дифракционной решетки угловым расстояниям от этой линии до репера. Ток разряда и диаметр диафрагмы при этом можно оптимизировать по выходным параметрам. В этом случае в спектре выходного излучения, как показано на рис.2,в, за счет генерации на горячих и секвенционных переходах дополнительно присутствует большое число линий [10].

Для лазерных систем низкого давления с продольным разрядом и меньшей длиной активной среды или с недостаточно добротным резонатором, когда затруднительно получить генерацию на слабых линиях (до линии P(48), обладающей коэффициентом усиления, сравнимым с коэффициентом усиления реперной линии P(56)), можно использовать в качестве реперных другие аномальные линии генерации, например линию R(38) полосы 00⁰1 – 02⁰0, которая совпадает с линией R(41) полосы секвенции 00⁰2 – 02⁰1 (центры линий отстроены на 257 МГц) [2, 3].

Мы провели аналогичные исследования и по настройке импульсно-периодического ТЕА CO₂-лазера на заданную линию генерации без спектрального прибора. Анализ особенностей спектральных характеристик CO₂-лазеров с высоким давлением активной среды показал, что в этом случае в качестве реперных линий оптимальны другие аномальные линии. На рис.4 приведена часть экспериментально полученного спектра генерации ТЕА CO₂-лазера с УФ предыонизацией. Длина активной среды $L = 70$ см, ширина электродов составляет 3 см, межэлектродный промежуток – 2 см. Активная среда имела состав CO₂:N₂:He = 1:1:4, напряжение на накопительном конденсаторе емкостью 0.2 мкФ было равно 30 кВ. Подробно конструкция лазера и особенности его работы описаны в [5]. Из рис.4 видно, что в качестве реперной линии больше всего подходит линия P(52) полосы 00⁰1 – 02⁰0. Небольшим варьированием соотношения усиления и по-

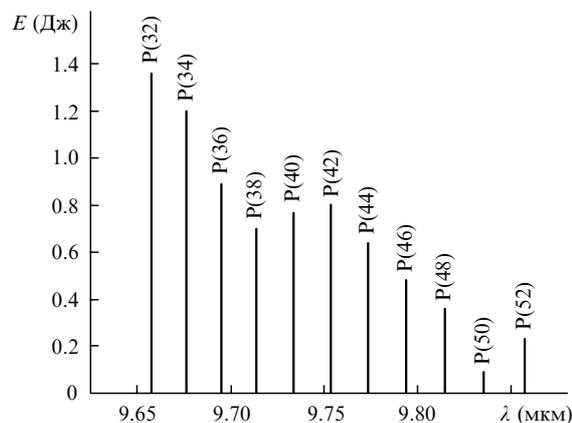


Рис.4. Часть спектра генерации ТЕА CO₂-лазера с аномальными линиями P-ветви полосы 00⁰1 – 02⁰0.

ть резонатора можно реализовать условие, при котором не будет генерации на линии P(50) и будет применен алгоритм поиска нарушения эквидистантности генерируемых линий, аналогичный рассмотренному ранее для лазера низкого давления с продольным разрядом. Если лазер не может генерировать линии с $J > 44$, то, как видно из рис.4, для реализации условия нарушения эквидистантности линий генерации можно при соответствующем подборе соотношения усиления и потерь использовать отсутствие генерации на линии P(38).

Неоднократная проверка процесса настройки с помощью монохроматора SPM-2 показала надежность настройки на выбранную линию по данной методике. Методика нахождения реперной линии с аномальным усилением может также применяться и для других лазерных систем с развитыми спектрами генерации.

1. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И. и др. *ЖПС*, **47**, 15 (1987).
2. Reid J., Siemsen K.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 217 (1978).
3. Rothman L.S. *Appl. Opt.*, **25**, 1795 (1986).
4. Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я., Чураков В.В. *ПТЭ*, № 1, 159 (1994).
5. Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я., Чураков В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 514 (1995).
6. Петухов В.О., Пивоварчик В.Ф., Солонухин А.С., Трушин С.А., Чураков В.В. *ПТЭ*, № 4, 172 (1987).
7. Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я., Чураков В.В. А.с. РФ № 1771367 (1992). *БИ*, № 39, 192 (1992).
8. Churakov V.V., Gorobets V.A., Petukhov V.O. *Infrared Phys.*, **29**, 339 (1989).
9. Смит К., Томсон Р. *Численное моделирование газовых лазеров* (М.: Мир, 1981).
10. Горобец В.А., Петухов В.О., Чураков В.В. *Труды конф. «Лазерная физика и спектроскопия»* (Гродно, Беларусь, 1997, т. 1, с. 78).