

## МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В отличие от нейтральных атомов, энергетический спектр молекул гораздо богаче, т.к. для них, к движению электронов добавляется еще колебания ядер атомов и вращение молекулы. В зависимости от типа участвующего в генерации перехода, молекулярные лазеры можно разделить на следующие три класса:

1. *Лазеры на колебательно-вращательных переходах.* В таких лазерах используются переходы между колебательными уровнями одного и того же электронного состояния (основного состояния), и разница энергий между уровнями перехода такого типа попадает в область от среднего до дальнего ИК - диапазона (2,5-300 мкм). В настоящее время наибольшее значение из этого класса лазеров имеет CO<sub>2</sub> лазер, генерирующий на длине волны 10,6 или 9,6 мкм. Следует упомянуть и другие примеры, такие как CO лазер ( $\lambda \approx 5$  мкм) и химический HF лазер ( $\lambda \approx 2,7-3,3$  мкм).

2. *Лазеры на электронно-колебательных (вибронных) переходах.* В таких лазерах используются переходы между колебательными уровнями различных электронных состояний. В этом случае длина волны генерации обычно попадает в УФ-область спектра. Наиболее интересный пример этой категории лазеров — азотный лазер ( $\lambda \approx 337$  нм). Отдельный класс лазеров, который можно было бы отнести к вибронным лазерам, составляют эксимерные лазеры. В этих лазерах используются переходы между различными электронными состояниями специальных молекул (эксимеров) с длиной волны излучения, лежащей, как правило, в УФ-диапазоне. Однако эксимерные лазеры используют не только переходы между связанными состояниями (связанно - связанные переходы), но и, что бывает гораздо чаще, переходы между связанным верхним состоянием и основным состоянием, в котором атомы отталкиваются друг от друга (связанно-свободные переходы). Поэтому целесообразно рассматривать эти лазеры как отдельную категорию.

3. *Лазеры на чисто вращательных переходах.* В них используются переходы между различными вращательными уровнями одного и того же колебательного состояния (как правило, возбужденного колебательного уровня основного электронного состояния). Соответствующая длина волны генерации попадает в дальний ИК или субмиллиметровый диапазон (25 мкм-1 мм). В лазерах данного типа труднее получить генерацию, поскольку релаксация между вращательными уровнями происходит, как правило, с очень большой скоростью. Поэтому такие лазеры обычно накачивают оптически, используя выходное излучение другого лазера (как правило, CO<sub>2</sub> лазера). Оптическая накачка возбуждает данную молекулу (например, CH<sub>3</sub>F,  $\lambda=496$  мкм) на вращательный уровень, принадлежащий некоторому колебательному состоянию, расположенному выше основного уровня. После этого генерация осуществляется на переходах между вращательными уровнями данного верхнего колебательного состояния. В СССР ведущую роль в разработке таких лазеров играли кафедра квантовой радиофизики Харьковского Университета.

### CO<sub>2</sub> ЛАЗЕР

В этом лазере в качестве активной среды используется специальная смесь газов CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и He. Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы CO<sub>2</sub>, а азот и гелий, как будет показано ниже, значительно повышают КПД лазера.

CO<sub>2</sub> лазер является одним из самых мощных (на газодинамическом CO<sub>2</sub> лазере получена выходная мощность порядка 700 кВт) и одним из наиболее эффективных лазеров (дифференциальный КПД 15-20%).

На рис. 1 приведены схемы энергетических уровней основных электронных состояний молекул CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Поскольку N<sub>2</sub> является двухатомной молекулой, она имеет лишь одну колебательную моду, два нижних энергетических уровня которой ( $v=0$ ,  $v=1$ ) показаны на рисунке. Структура энергетических уровней молекулы CO<sub>2</sub> более сложная, поскольку эта молекула является линейной трехатомной. Здесь имеются три невырожденные колебательные моды (рис.2), а именно: 1) симметричная валентная мода, 2) деформационная мода и 3) асимметричная валентная мода. Поэтому колебания молекулы описываются тремя квантовыми числами  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$ , которые определяют число квантов в каждой колебательной моде. Это означает, что энергия, отсчитываемая от нулевого уровня, задается с помощью выражения  $E = h\nu_1 + h\nu_2 + h\nu_3$ , где  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  и  $\nu_3$  — резонансные частоты трех мод.

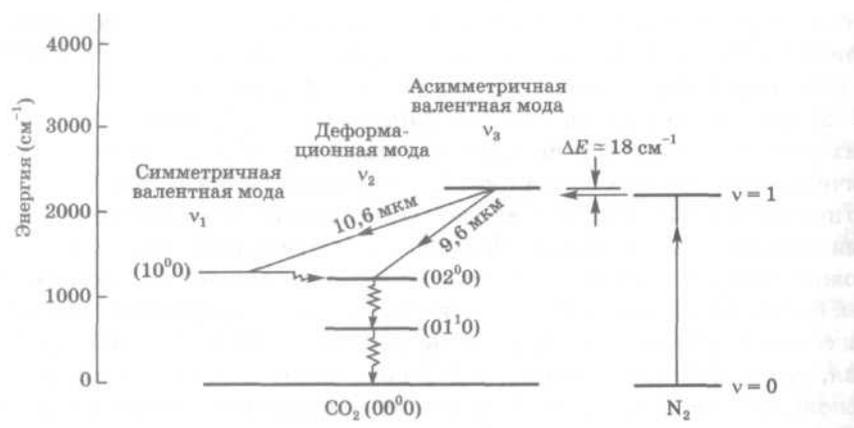


Рис. 1  
 Низшие колебательные уровни основного электронного состояния молекул CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> (для простоты картины здесь не показаны вращательные уровни)

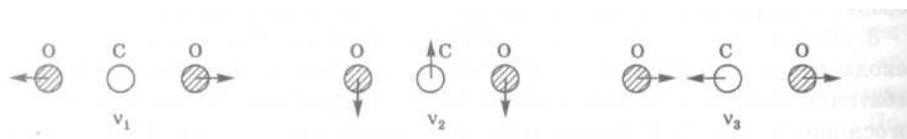


Рис. 2  
 Три фундаментальные колебательные моды молекулы CO<sub>2</sub>: (v<sub>1</sub>) симметричная валентная мода, (v<sub>2</sub>) деформированная мода, (v<sub>3</sub>) асимметричная валентная мода

Например, уровню 01<sup>1</sup>0 соответствует колебание, деформационная мода (мода 2) которого имеет один колебательный квант.<sup>1</sup> Поскольку из трех типов колебаний моде 2 соответствует наименьшая постоянная упругости (эти колебания являются поперечными), рассматриваемый уровень имеет наименьшую энергию. Генерация происходит на переходе между 00<sup>0</sup>1 и 10<sup>0</sup>0 уровнями ( $\lambda \cong 10,6$  мкм), хотя также можно получить генерацию и на переходе между уровнями 00<sup>0</sup>1 и 02<sup>0</sup>0 ( $\lambda \cong 9,6$  мкм).

Накачка на верхний лазерный уровень 00<sup>0</sup>1 происходит очень эффективно благодаря следующим двум процессам:

1. *Непосредственные столкновения с электронами.* Очевидно, что основной тип столкновений, который следует рассмотреть, имеет вид:  $e + \text{CO}_2(000) \rightarrow e + \text{CO}_2(001)$ . Сечение столкновения с электроном для данного процесса очень велико и намного превышает соответствующие сечения возбуждения уровней 100 и 020. Возможно, это связано с тем, что переход 000  $\rightarrow$  001 оптически разрешен, в то время как переход, например, 000  $\rightarrow$  100 не является таковым. Кроме того, следует отметить, что прямой электронный удар может приводить и к возбуждению верхних (0,0,n) колебательных уровней молекулы CO<sub>2</sub>. Однако молекула CO<sub>2</sub> быстро релаксирует с этих верхних состояний в состояние (001) посредством околорезонансных столкновений типа<sup>2</sup>:



Данный процесс приводит к релаксации всех возбужденных молекул в состояние (001). Заметим, что наиболее вероятным является столкновение возбужденной и невозбужденной молекулы, поскольку большинство молекул CO<sub>2</sub> в газовой смеси все же находятся в основном состоянии.

<sup>1</sup> Верхний индекс, стоящий справа при квантовом числе, соответствующем деформационной моде (будем обозначать этот индекс через  $l$ ), возникает из-за того, что в рассматриваемом случае деформационная мода является дважды вырожденной. Действительно, колебание может происходить как в плоскости рис. 10.10, так и в плоскости, перпендикулярной ей. Следовательно, деформационное колебание представляет собой определенную комбинацию этих двух колебаний, которая описывается верхним индексом  $l$ , точнее говоря, величина  $l_h$  представляет собой угловой момент этого колебания относительно оси молекулы CO<sub>2</sub>. Например, в состоянии 02<sup>0</sup> ( $l = 0$ ) два вырожденных колебания комбинируются таким образом, что угловой момент  $l_h = 0$ .

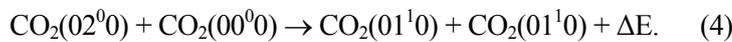
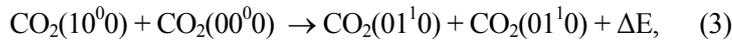
<sup>2</sup> Процесс релаксации, в котором колебательная энергия отдается в виде колебательной энергии другой молекуле того же или иного типа, обычно называется W-релаксацией.

2. *Резонансная передача энергии от молекулы N<sub>2</sub>*. Этот процесс имеет так же большую эффективность благодаря тому, что разница энергий между возбужденными уровнями двух молекул невелика ( $\Delta E = 18 \text{ см}^{-1}$ ). Кроме того, очень эффективным является процесс возбуждения молекулы N<sub>2</sub> из основного состояния на уровень  $v=1$  при столкновениях с электронами, причем уровень  $v=1$  является метастабильным. В самом деле, переход  $1 \rightarrow 0$  является запрещенным (в электродипольном приближении), поскольку в силу своей симметрии молекула N - N не может обладать полным дипольным моментом. Наконец, более высокие колебательные уровни молекулы N<sub>2</sub> находятся почти в резонансе ( $\Delta E < kT$ ) с соответствующими уровнями молекулы CO<sub>2</sub> (вплоть до уровня 00<sup>0</sup>5), а переходы между возбужденными уровнями 00n и 00l молекулы CO<sub>2</sub> происходят с очень большой скоростью за счет процесса (1).

Рассмотрим теперь релаксацию верхнего и нижнего лазерных уровней. С этой целью заметим, что, хотя переходы 00<sup>0</sup>1  $\rightarrow$  10<sup>0</sup>0, 00<sup>0</sup>1  $\rightarrow$  02<sup>0</sup>0, 10<sup>0</sup>0  $\rightarrow$  01<sup>0</sup>0 и 02<sup>0</sup>0  $\rightarrow$  01<sup>0</sup>0 оптически разрешены, соответствующие времена релаксации  $\tau_{\text{ест}}$  для спонтанного излучения очень велики (напомним, что  $\tau_{\text{ест}} \propto 1/\nu^3$ ). Поэтому релаксация различных указанных уровней в большей мере определяется столкновениями. В соответствии с этим время релаксации верхнего лазерного уровня T<sub>s</sub> можно представить через сумму:

$$(1/\tau_{\text{ест}}) = \sum \alpha_i p_i, \quad (2)$$

где p<sub>i</sub> - парциальные давления, а  $\alpha_i$  - константы, соответствующие каждой компоненте газовой смеси в разряде. Рассматривая, например, случай, когда полное давление смеси равно 15 мм. рт. ст. (при парциальных давлениях CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He в отношении 1:1:8), находим, что время жизни верхнего лазерного уровня составляет  $\tau_s \cong 0,4$  мкс. Что касается скорости релаксации нижнего уровня, то прежде всего заметим, что вероятность перехода 100  $\rightarrow$  020 очень велика и этот переход происходит очень быстро даже в изолированной молекуле. Действительно, разность энергий этих двух уровней много меньше kT. Кроме того, эти состояния взаимодействуют друг с другом (резонанс Ферми), поскольку деформационное колебание стремится изменить расстояние между атомами кислорода (т.е. вызывает симметричное растяжение). При этом уровни 10<sup>0</sup>0 и 02<sup>0</sup>0 эффективно связаны с уровнем 01<sup>0</sup>0 (VV-релаксация) посредством двух процессов — околорезонансных столкновений с молекулами CO<sub>2</sub> в основном состоянии:



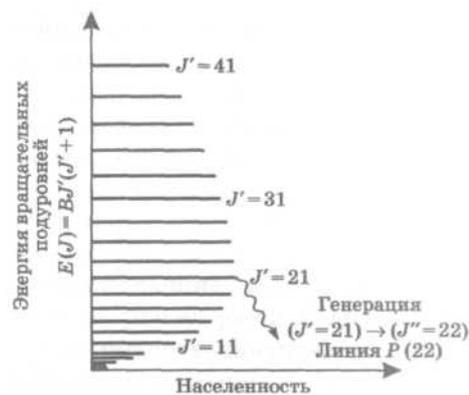
Вероятность этих двух процессов достаточно велика, поскольку  $\Delta E$  и  $\Delta E'$  много меньше величины kT. Следовательно, населенности трех уровней 10<sup>0</sup>0, 02<sup>0</sup>0 и 01<sup>0</sup>0 достигают теплового равновесия за очень короткое время.

Теперь осталось определить скорость релаксации с уровня 01<sup>0</sup>0 на основное состояние 00<sup>0</sup>0. Если бы она была небольшой, то это привело бы к аккумуляции молекул на уровне 01<sup>0</sup>0 во время генерации лазера, а затем к накоплению населенности на уровнях 10<sup>0</sup>0 и 02<sup>0</sup>0, поскольку они находятся в тепловом равновесии с уровнем 01<sup>0</sup>0. Таким образом, произошло бы замедление процесса релаксации всех трех уровней, т. е. в общем процессе релаксации переход 01<sup>0</sup>0  $\rightarrow$  00<sup>0</sup>0 представлял бы собой «узкое место». В связи с этим важно изучить вопрос о времени жизни уровня 01<sup>0</sup>0. Заметим, что, поскольку переход 01<sup>0</sup>0  $\rightarrow$  00<sup>0</sup>0 обладает наименьшей энергией, релаксация с уровня 01<sup>0</sup>0 может происходить только путем передачи этой энергии в энергию поступательного движения сталкивающихся частиц (VT-релаксация). Из теории столкновений известно, что энергия с большей вероятностью передается более легким атомам, т. е. в нашем случае — гелию. Это означает, что время жизни уровня снова определяется выражением типа (2), причем коэффициент  $\alpha_i$  для He много больше, чем для остальных частиц. При тех же парциальных давлениях, что и в рассмотренном выше примере, время жизни составляет около 20 мкс. Из всего вышеизложенного следует, что это же значение времени жизни имеет и нижний лазерный уровень. За счет того, что время жизни верхнего лазерного состояния намного больше, населенность будет накапливаться на верхнем лазерном уровне и условие непрерывной генерации будет выполняться. Заметим, что наличие гелия приводит и к другому важному эффекту — за счет своей высокой теплопроводности гелий способствует поддержанию низкой температуры CO<sub>2</sub> вследствие отвода теплоты к стенкам газоразрядной трубки. Низкая температура поступательного движения CO<sub>2</sub> необходима для того, чтобы избежать заселенности нижнего лазерного уровня за счет теплового возбуждения, поскольку разность энергий между уровнями в действительности сравнима с kT. Таким образом, благоприятное воздействие, которое оказывают на лазер молекулы N<sub>2</sub> и He, объясняется тем, что N<sub>2</sub> способствует заселенности верхнего лазерного уровня, а He — обеднению нижнего. Из представленного выше рассуждения ясно, что генерация в CO<sub>2</sub> лазере может осуществляться либо на переходе (00<sup>0</sup>1)  $\rightarrow$  (10<sup>0</sup>0) ( $\lambda=10,6$  мкм), либо на переходе (00<sup>0</sup>1)  $\rightarrow$  (02<sup>0</sup>0) ( $\lambda=9,6$  мкм). Поскольку сечение первого перехода больше, а верхний уровень один и тот же, генерация, как правило, происходит на переходе 00<sup>0</sup>1  $\rightarrow$

$10^0$ . Для получения генерации на линии 9,6 мкм в резонатор (для подавления генерации на линии с наибольшим усилением) помещается соответствующее частотно-селективное устройство (например, эшелетт вместо полупрозрачного зеркала).

До этого момента при обсуждениях не учитывался тот факт, что как верхний, так и нижний лазерный уровни на самом деле состоят из многих близко расположенных вращательных подуровней. Соответственно и лазерный переход может состоять из нескольких равноотстоящих колебательно-вращательных переходов, принадлежащих Р- или R-ветвям, причем Р-ветвь проявляет наибольшее усиление в лазере. Для полноты картины следует также учесть и тот факт, что благодаря бoльцмановскому распределению населенности между вращательными уровнями, наибольшую населенность имеет вращательный уровень  $J' = 21$  верхнего  $00^0_1$  состояния (рис. 3)<sup>1</sup>.

Рис. 3  
Относительная населенность вращательных уровней  
верхнего лазерного уровня молекулы  $\text{CO}_2$



На самом деле генерация фактически будет происходить на колебательно-вращательном переходе с наибольшим усилением, т. е. на том переходе, который имеет наибольшую населенность верхнего лазерного уровня. Это происходит потому, что скорость термализации вращательных уровней в  $\text{CO}_2$  лазере [ $\sim 10^7 \text{ с}^{-1}$  (мм.рт.ст.)<sup>-1</sup>] оказывается больше, чем скорость уменьшения населенности (за счет спонтанного и вынужденного излучения) того вращательного уровня, с которого происходит лазерная генерация. Поэтому в генерации лазера на вращательном переходе с максимальным усилением будет принимать участие полная населенность всех вращательных уровней. Следовательно, подводя итог данному рассуждению, можно сказать, что генерация в  $\text{CO}_2$  лазере при нормальных условиях возникает на линии Р(22) (т.е.  $(J'=21) \rightarrow (J''=22)$ ) перехода  $(00^0_1) \rightarrow (10^0_0)$ . Другие линии того же самого перехода, а также линии, принадлежащие переходу  $(00^0_1) \rightarrow (02^0_0)$ , можно выделить с помощью эшелетта (расстояние между вращательными линиями в  $\text{CO}_2$  лазере составляет около  $2 \text{ см}^{-1}$ ).

Основной вклад в ширину линии генерации  $\text{CO}_2$  лазера дает эффект Доплера. Однако по сравнению с лазером, скажем видимого диапазона, из-за низкой частоты  $\nu_0$  лазерного перехода доплеровская ширина линии довольно мала (около 50 МГц). Однако теперь уже нельзя пренебрегать столкновительным уширением, которое становится весьма преобладающим в  $\text{CO}_2$  лазерах, работающих при высоком полном давлении газовой смеси ( $p > 100 \text{ мм.рт.ст.}$ ).

С точки зрения конструкции,  $\text{CO}_2$  лазеры можно подразделить на восемь типов: (1) лазеры с медленной продольной прокачкой, (2) отпаянные лазеры, (3) волноводные лазеры, (4) лазеры с быстрой продольной прокачкой, (5) лазеры с диффузионным охлаждением, (6) лазеры с поперечной прокачкой, (7) лазеры с поперечным возбуждением при атмосферном давлении (*TEA* лазеры) и (8) газодинамические лазеры. Прежде чем рассматривать отмеченные лазеры, следует указать на то, что, хотя они и отличаются друг от друга по многим своим рабочим параметрам (например, выходной мощности), все они имеют общую важную особенность, а именно высокий дифференциальный КПД (15-25%). Столь высокий КПД является следствием большого квантового выхода ( $\sim 40\%$ ; см. рис.1) и высокоэффективного процесса накачки, который имеет место в  $\text{CO}_2$  лазере при оптимальной электронной температуре разряда.

<sup>1</sup> Заметим, что в силу симметрии заселяются лишь уровни с нечетными значениями  $J$  молекулы  $\text{CO}_2$ .

1. *Лазеры с медленной продольной прокачкой.* Впервые генерация в  $\text{CO}_2$  лазере была получена в лазере именно такого типа. В данном лазере газовая смесь медленно прокачивается вдоль лазерной трубки (см. рис.4) лишь для того, чтобы удалить продукты диссоциации, в частности  $\text{CO}$ , которые в противном случае загрязняют лазерную среду. Отвод тепла обеспечивается теплопередачей в радиальном направлении к стенкам трубки (обычно стеклянным), которые охлаждаются извне подходящим теплоносителем (как правило, водой). Часто применяется конструкция с внутренним зеркалом, и, по крайней мере (в конфигурации рис.4) один из металлических держателей, который включает в себя зеркало резонатора, должен находиться под высоким напряжением.

Одно из главных ограничений этого лазера состоит в том, что независимо от диаметра трубки в нем имеет место верхний предел выходной мощности с единицы длины разряда (50-60 Вт/м).

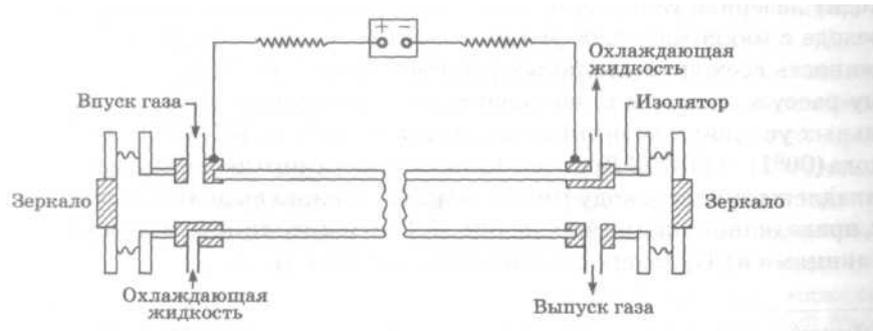


Рис. 4

Схематическое изображение  $\text{CO}_2$  лазера с продольной прокачкой газа

Т.к. для поддержания оптимальной электронной температуры разряда должно быть постоянным произведение  $pD$  [ $\sim 22,5$  (мм. рт. ст.) см; например 15 мм. рт. ст. при  $D = 1,5$  см]; Из-за ограничений на тепловыделение, связанных с необходимостью отвода тепла к стенкам трубки, существует оптимальное значение плотности тока, причем оно обратно пропорционально диаметру трубки  $D$ . Тот факт, что оптимальное значение  $J$  должно существовать, можно понять, если заметить, что избыточная плотность тока приводит к избыточному нагреву смеси (даже если КПД составляет 20%, тем не менее, около 80% электрической мощности рассеивается в разряде в виде тепла), вследствие чего имеет место тепловая заселенность нижних лазерных уровней. С другой стороны, обратно пропорциональную зависимость оптимального значения  $J$  от  $D$  можно объяснить, принимая во внимание тот факт, что чем больше диаметр трубки, тем более затруднена передача выделяющегося тепла к стенкам. Из этих рассуждений можно заключить, что при оптимальных условиях оба параметра  $J$  и  $p$  обратно пропорциональны величине  $D$  и, следовательно, оптимальное значение  $P$  определяется лишь длиной трубки  $l$ .

$\text{CO}_2$  лазеры с медленной продольной прокачкой относительно низкой мощности (50-100 Вт) широко используются в лазерной хирургии, для подгонки резисторов, для резки керамических пластин в электронной промышленности и сварки тонких металлических листов (толщиной меньше 1 мм).

2. *Отпаянные лазеры.* Если в устройстве, показанном на рис.4, остановить прокачку газовой смеси, то через несколько минут генерация прекратится, поскольку продукты химической реакции (в частности, молекулы  $\text{CO}$ ), образующиеся в разряде, будут не удаляться, а поглощаться стенками трубки или начнут взаимодействовать с электродами, нарушая таким образом равновесие в смеси  $\text{CO}_2$ - $\text{CO}$ - $\text{O}_2$ . В конечном счете, это приведет к диссоциации большого числа молекул  $\text{CO}_2$  в газовой смеси. Чтобы обеспечить регенерацию молекул  $\text{CO}_2$  из  $\text{CO}$ , в газоразрядной трубке отпаянного лазера должен находиться определенный катализатор. Для этого в газовую смесь можно просто добавить небольшое количество паров воды (около 1 %). В данном случае регенерация молекул  $\text{CO}_2$  осуществляется, по-видимому, благодаря следующей реакции:



в которой участвуют колебательно-возбужденные молекулы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Требуемое сравнительно небольшое количество паров воды можно получить, добавляя в разряд газообразный водород и кислород. В действительности оказывается, что в смесь необходимо добавлять только водород, поскольку кислород образуется в процессе диссоциации молекул  $\text{CO}_2$ . Другая возможность

инициирования реакции релаксации основана на использовании горячего ( $300^{\circ}\text{C}$ ) никелевого катода, который играет роль катализатора. Применение этих методов привело к созданию отпаянных трубок с долговечностью более 10 000 ч. Выходная мощность отпаянных лазеров с единицы длины составляет около 60 Вт/м, что сравнимо с мощностью лазеров с продольной прокачкой газа. Маломощные (порядка 1 Вт) отпаянные лазеры с коротким резонатором (что позволяет работать в одномодовом режиме) нередко применяются в качестве гетеродинов в экспериментах по оптическому гетеродинированию. Отпаянные  $\text{CO}_2$  лазеры с более высокой мощностью (порядка 10 Вт) привлекают внимание ученых с точки зрения использования их в лазерной микрохирургии, а также в микрообработке.

3. *Капиллярные волноводные лазеры.* Если диаметр лазерной трубки на рис.4 уменьшить до нескольких миллиметров (2 - 4 мм), то лазерное излучение в трубке будет распространяться, как в волноводе. Такие волноводные  $\text{CO}_2$  лазеры имеют низкие дифракционные потери. Было показано, что наилучшие характеристики достигаются на трубках, изготовленных из  $\text{BeO}$  или  $\text{SiO}_2$ . Главным преимуществом волноводного  $\text{CO}_2$  лазера является то, что благодаря небольшому диаметру отверстия давление смеси должно быть высоким (100-200 мм. рт. ст.). Возрастание давления приводит к увеличению усиления на единицу длины. Это означает, что можно изготавливать короткие  $\text{CO}_2$  лазеры ( $L < 50$  см), не сталкиваясь с трудной задачей уменьшения потерь в резонаторе. Однако мощность, которую можно снять с единицы длины разряда, подвержена тому же ограничению, что и мощность рассмотренного выше лазера с медленной продольной прокачкой ( $\sim 50$  Вт/м). Поэтому волноводные  $\text{CO}_2$  лазеры играют особенно важную роль, когда имеется необходимость в компактных  $\text{CO}_2$  лазерах низкой мощности ( $P < 30$  Вт) (например, для лазерной микрохирургии).

Чтобы полностью реализовать все преимущества, связанные с компактностью конструкции, волноводные лазеры, как правило, изготавливают в отпаянном виде. Конструкция лазера может быть такой, как на рис.4, когда ток разряда протекает вдоль лазерной трубки, либо такой, как показано на рис.5, когда электрический ток (обычно от высокочастотного источника) течет поперек трубки. При фиксированном значении электрического поля  $E$  (в силу того, что величина  $E/r$  должна быть постоянной) конструкция с поперечной накачкой имеет значительное преимущество перед

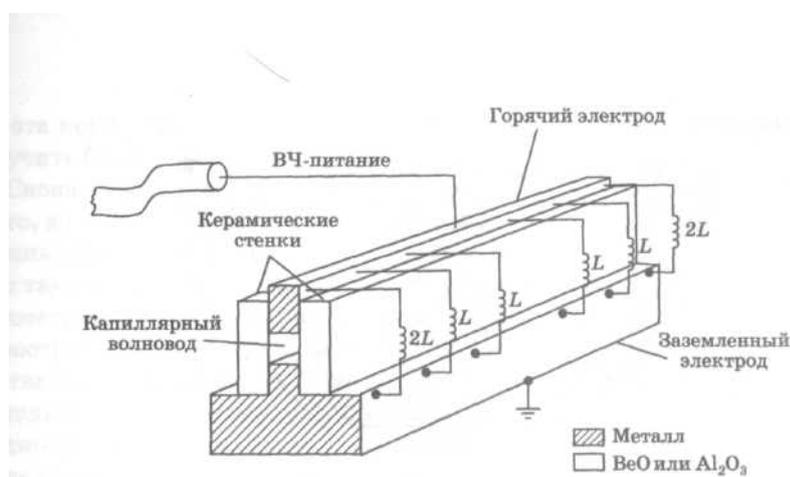


Рис.5

Схематическое представление волноводного  $\text{CO}_2$  лазера с накачкой ВЧ-полем

продольной накачкой, поскольку она допускает намного более низкие (на один-два порядка величины) напряжения на электродах. Высокочастотное ( $\nu \cong 30$  МГц) возбуждение обладает многими преимуществами, среди которых наиболее существенными, возможно, являются следующие:

- в этой схеме отсутствуют постоянные анод и катод, и поэтому исчезают проблемы, связанные с химическими процессами в газе вблизи катода;
- благодаря включению последовательно с разрядом простых элементов, не рассеивающих энергию (например, диэлектрической пластины), обеспечивается устойчивый разряд.

В силу этих различных преимуществ высокочастотные разряды все больше применяются не только в волноводных лазерах, но и в лазерах как с быстрой продольной прокачкой, так и с

поперечной прокачкой; они будут рассмотрены ниже. В качестве последнего замечания следует отметить, что трубку волноводного CO<sub>2</sub> лазера либо вообще не охлаждают, либо охлаждают воздушной струей, если необходимо получить максимальную мощность.

4. *Лазеры с быстрой продольной прокачкой.* Одним из возможных и технически очень интересных решений, которое позволяет преодолеть ограничения по выходной мощности лазеров, является прокачка газовой смеси вдоль трубки с очень высокой скоростью (около 50 м/с). В этом случае тепло отводится путем удаления разогретой смеси, которая, прежде чем вернуться в трубку, охлаждается вне ее пределов в соответствующем теплообменнике (см. рис.6). Накачку обеих лазерных трубок, которые изображены на рисунке, можно обеспечить либо постоянным продольным, либо высокочастотным поперечным разрядом (поперек стеклянной трубки), что применяется наиболее часто. При такой конфигурации лазера плотность тока не имеет оптимального значения, таким образом, мощность фактически возрастает линейно с увеличением  $J$  и можно достичь значительно более высокой выходной мощности на единицу длины разряда (~1 кВт/м и даже больше). Помимо охлаждения, смесь за пределами трубки пропускается через катализатор, для того чтобы газ СО прореагировал с молекулами O<sub>2</sub> (некоторое количество кислорода уже имеется в смеси благодаря диссоциации молекул CO<sub>2</sub> в области разряда). Это обеспечивает необходимую регенерацию молекул CO<sub>2</sub> в трубке. В этом режиме необходимая подпитка смеси крайне мала, и можно добиться работы в полностью запаянном режиме. В настоящее время мощные CO<sub>2</sub> лазеры (мощность 1-3 кВт) с быстрой продольной прокачкой нашли широкое применение во многих приложениях, связанных с обработкой материалов и, в частности, для лазерной резки металлов (толщиной до нескольких миллиметров).

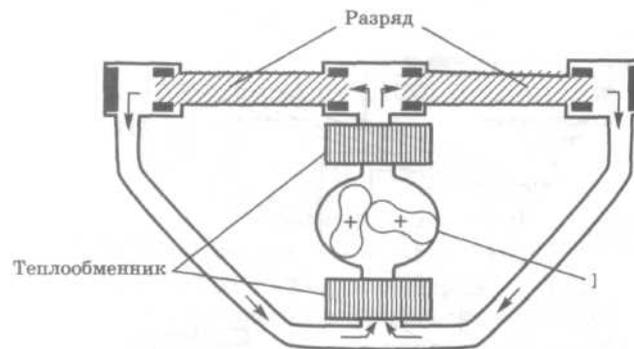


Рис.6

Схематическое представление CO<sub>2</sub> лазера с быстрой продольной прокачкой

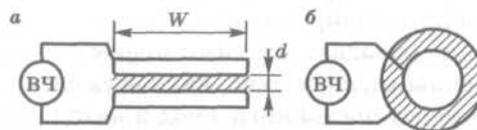


Рис. 7

Схема CO<sub>2</sub> лазера с диффузионным охлаждением:

а) пленарная; б) кольцеобразная конфигурация электродов.

5. *Лазер с диффузионным охлаждением.* Альтернативным способом обойти имеющиеся ограничения по мощности в лазерах с медленной продольной прокачкой является использование конструкции с электродами (для получения поперечного разряда), отстоящими друг от друга на расстояние  $d$ , которое много меньше ширины  $W$  каждого электрода (пленарная конфигурация, см. рис.7а). В этом случае газовая смесь очень эффективно охлаждается одномерным тепловым потоком, направленным к водоохлаждаемым электродам. Здесь можно показать, что выходная мощность равна  $P_{\text{out}} = C(Wl)/d$ , где  $C$  — постоянное число ( $C \cong 50$  Вт/м) и  $l$  — длина электрода. Таким образом, для заданного расстояния между электродами выходная мощность зависит от площади электрода

$Wl$ , а не от его длины, как, например, в  $CO_2$  лазере с медленной продольной прокачкой. Тогда при достаточно малом расстоянии между электродами можно получить большую мощность на единицу площади электрода (например,  $(P_{out}/Wl) = 20 \text{ кВт/м}^2$  для  $d = 3 \text{ мм}$ ). Вместо планарной конфигурации также можно использовать кольцеобразную конфигурацию (рис.7б). Несмотря на то, что эта конфигурация является технически более сложной, она позволяет получить более компактную конструкцию лазера.

Снова следует подчеркнуть, что вышеприведенные результаты имеют место, даже если ширина электродов значительно (примерно на порядок величины) больше, чем расстояние между ними. Использование активной среды с таким удлинением затрудняет получение хороших свойств разряда и параметров расходимости выходного излучения. Тем не менее, стабильный и пространственно однородный разряд можно получить, используя преимущества высокочастотного возбуждения. С другой стороны, излучение лазера подвержено волноводному эффекту в направлении, нормальном к поверхности электрода, и оно свободно распространяется в направлении, параллельном его поверхности, при расстоянии между электродами порядка нескольких миллиметров. Для получения выходных пучков хорошего качества разработаны гибридные резонаторы, которые являются устойчивыми в направлении, перпендикулярном поверхности электродов, и неустойчивыми в направлении, параллельном поверхности электродов.

В настоящий момент серийно выпускаются мощные компактные  $CO_2$  лазеры с диффузным охлаждением и планарной конфигурацией электродов (выходная мощность составляет более 1 кВт). Такие лазеры представляют большой интерес в приложениях, связанных с обработкой материалов.

6. *Лазеры с поперечной прокачкой.* Другой возможностью обойти ограничения по мощности в лазерах с медленной продольной прокачкой является прокачка газовой смеси в направлении, перпендикулярном разряду (рис.8). Если смесь прокачивать достаточно быстро, то, как и в случае лазера с быстрой продольной прокачкой, теплота уносится конвекцией, а не путем переноса ее к стенкам трубки. Поэтому насыщения выходной мощности при увеличении тока разряда не происходит, и можно достичь высоких выходных мощностей с единицы длины разряда (несколько кВт/м), как и в лазерах с быстрой продольной накачкой. Следует заметить, что в этом случае оптимальное общее давление смеси оказывается примерно на порядок выше (~100 мм. рт. ст.), чем в системах с продольной прокачкой и большим диаметром трубки. Увеличение общего давления  $p$  требует соответствующего увеличения электрического поля  $E$  разряда. Действительно, для реализации оптимальных условий работы такого лазера необходимо, чтобы во всех случаях

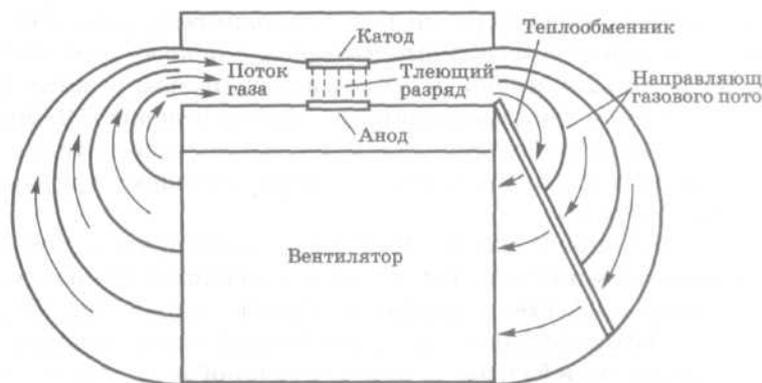


Рис.8

Схема устройства  $CO_2$  лазера с поперечной прокачкой

отношение  $E/p$  оставалось примерно одинаковым, поскольку это отношение определяет среднюю энергию электронов в разряде. Однако при этом устройство с продольным разрядом в конфигурации, приведенной на рис.4, оказалось бы непрактичным, поскольку оно потребовало бы очень высокого приложенного напряжения (100-500 кВ на длине разряда 1 м). Поэтому конструкцию делают таким образом, чтобы разряд протекал в направлении, перпендикулярном оси резонатора (такие устройства называются ТЕ лазерами, аббревиатура англ. *transverse electric field* — поперечное электрическое поле).

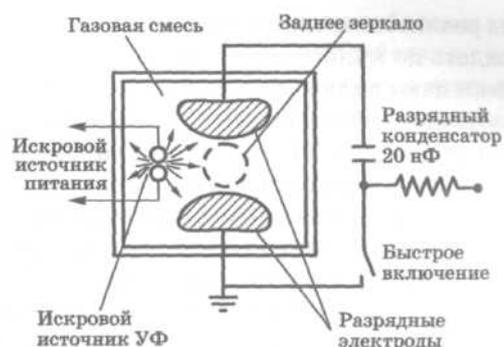
Мощные ТЕ- $CO_2$  лазеры с быстрой поперечной прокачкой (мощность составляет 1-20 кВт) широко применяются во многих приложениях, связанных с обработкой металлов (резание, сварка, поверхностная закалка, поверхностное легирование металлов). По сравнению с лазерами с быстрой продольной прокачкой эти лазеры имеют более простую конструкцию, поскольку для

поперечной прокачки не нужна большая скорость газового потока, как в случае с продольной прокачкой. Однако лазеры с быстрой продольной прокачкой имеют значительно лучшее качество пучка, поскольку в них ток разряда обладает цилиндрической симметрией, что делает эти лазеры особенно привлекательными для механической обработки резанием.

7. *CO<sub>2</sub> лазеры атмосферного давления с поперечным возбуждением (ТЕА лазеры).* В непрерывных ТЕ-СО<sub>2</sub> лазерах довольно затруднительно поднять давление выше ~100 мм. рт. ст. В тлеющем разряде при давлении выше этого значения (и при обычно используемых плотностях тока) возникают неустойчивости, которые приводят к образованию дуги в объеме разряда. Для преодоления этих трудностей к электродам, между которыми происходит поперечный разряд, прикладывают импульсное напряжение. Если длительность импульса достаточно мала (доля микросекунды), то неустойчивости в разряде не успевают развиваться и, следовательно, рабочее давление газа можно повысить вплоть до атмосферного и выше. Такие лазеры называются ТЕА лазерами (аббревиатура англ. слов *transversely excited at atmospheric pressure* — *лазеры атмосферного давления с поперечным возбуждением*). Таким образом, ТЕА лазеры работают в импульсном режиме и позволяют получать большую энергию с единицы объема разряда (10-50 Дж/л). Для предотвращения дугового разряда в таких лазерах используется тот или иной тип ионизации, которая предшествует возбуждающему импульсу напряжения (*предыонизация*).

На рис.9 приведена схема, которая часто применяется на практике и в которой ионизация обеспечивается интенсивным УФ-излучением от нескольких искр, пробегающих параллельно оси трубки. Такое УФ-излучение приводит к необходимой ионизации как посредством фотоионизации составляющих смеси, так и благодаря индуцированной этим излучением эмиссии электронов из электродов (УФ-предыонизация). К другим методам предыонизации относятся использование

**Рис. 9**  
Схематическое представление (вид вдоль оси устройства) ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера. Для предыонизации газа в лазере используется УФ-излучение от нескольких источников искрового разряда, размещенных вдоль направления трубки



импульсных источников электронного пучка (предыонизация электронным пучком) и ионизация благодаря коронному эффекту (коронная предыонизация). Как только во всем объеме лазерного разряда происходит ионизация, включается быстродействующий клапан (водородный тиратрон или разрядный промежуток) и через электроды разряда проскакивает главный разрядный импульс. При низкой частоте повторения импульсов (порядка 1 Гц) нет необходимости в прокачке газовой смеси. При более высоких частотах повторения импульсов (вплоть до нескольких килогерц) газовая смесь прокачивается в перпендикулярном оси резонатора направлении и охлаждается в соответствующем теплообменнике. Другой интересной характеристикой этих лазеров являются их относительно широкие полосы генерации (~ 4 ГГц при p=1 атм. благодаря столкновительному уширению). Таким образом, в ТЕА лазерах в режиме синхронизации мод были получены оптические импульсы длительностью менее 1 нс.

ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеры с поперечной прокачкой с относительно высокой частотой повторения (~50 Гц) и достаточно высокой средней выходной мощностью ( $\langle P_{out} \rangle \cong 300$  Вт) выпускаются серийно. Помимо широкого использования ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеров в научных приложениях, они распространены и в промышленности для обработки материалов, особенно в тех случаях, когда импульсный характер пучка дает некоторое преимущество (например, импульсная лазерная маркировка или импульсная абляция пластических материалов).

Цель работы: исследование спектральных и пространственно - энергетических характеристик излучения промышленного лазера на двуокиси углерода.

Приборы и оборудование: CO<sub>2</sub> - лазер, calorиметрический измеритель мощности ИМО-2 с дисковым ослабителем, проволочная дифракционная решетка, жидкокристаллический индикатор, линза из монокристалла NaCl.

В лабораторной работе используется отпаянный вариант конструкции лазера, изображенный на рис.10.

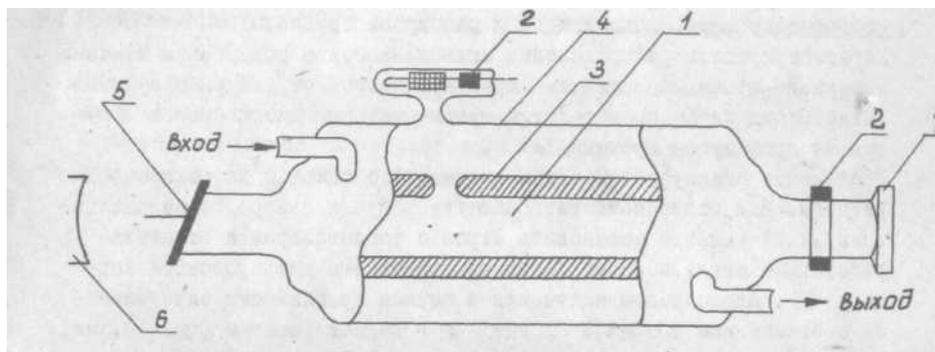


Рис.10 Конструкция CO<sub>2</sub> - лазера типа ЛГ-23

Основными элементами лазера являются газоразрядная трубка и оптический резонатор (рис.10). Газоразрядная трубка состоит из стеклянного капилляра I, в котором собственно происходит разряд (2-электроды), рубашки водяного охлаждения стенок капилляра 3, резервного баллона рабочей смеси 4, сообщающегося с рабочим объемом. На одном торце трубки прикреплена пластинка из GaAs (прозрачного в диапазоне  $\lambda \sim 10$  мкм полупроводника) под углом Брюстера к оси для уменьшения потерь излучения на переотражения и фиксации поляризации.

Оптический резонатор длиной  $L = 65$  см состоит из выносного зеркала 6 и внутреннего зеркала 7, прикрепленного к торцу газоразрядной трубки. Внутреннее зеркало представляет собой зеркальный слой металла, нанесенный на плоскую подложку из стекла, с коэффициентом отражения  $\sim 98\%$ . Внешнее зеркало имеет полупрозрачное специальное покрытие на сферической (с радиусом кривизны  $\sim 1,2$  м) подложке из монокристаллической пластины KCl. (прозрачной на  $\lambda \sim 10$  мкм). Юстировка зеркала, закрепленного в обойме, осуществляется с помощью трех винтов.

Электропитание лазера производится от блока питания с максимальным выпрямленным напряжением 10 кВ, поэтому снимать кожух и проводить какие-либо операции внутри корпуса излучательного блока **КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ!**

#### Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с техническими описаниями приборов и включить их согласно инструкциям.
2. Снять зависимость мощности генерируемого излучения от тока электрического разряда  $P(J)$ . Рассчитать значение рабочего к.п.д. ("от розетки") лазера  $\eta(J) = P_{\text{л}}/P_{\text{эл}}$ ,  $P_{\text{л}}$  - мощность излучения,  $P_{\text{эл}}$  - мощность постоянного тока, подводимого к разрядной трубке.
3. Зарегистрировать распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка, определить характер модовой структуры излучения. Регистрация пятна производится путем внесения листа бумаги в пучок на промежуток времени  $1 \div 5$  с.
4. Произвести оценку длины волны излучения с помощью дифракционной решетки. Для этого поместить решетку в пучок лазера, а на расстоянии  $l$  от решетки установить экран с тепловизором и отметить расстояний между первыми боковыми лепестками дифракционной картины  $l$ . Длина волны излучения в первом приближении определяется соотношением  $\lambda \approx dl/L$ , где  $d$  - период решетки ( $d=0,5$  мм). При проведении измерений не допускать внесения пленки с термочувствительным элементом в основной пучок во избежание ее повреждения.
5. Методом двух сечений определить расходимость лазерного пучка. Для этого измерить размеры выжженного пятна на бумаге в двух плоскостях, отстоящих друг от друга на расстоянии  $L$ . Время экспозиции подбирать таким образом, чтобы в обоих случаях эффект выжигания в точках с максимальной интенсивностью был одинаков. Угол расходимости определяется соотношением  $\theta = l/L$ , где  $l$  - разность диаметров пятен в двух сечениях.
6. Путем измерения контраста интерференционной картины от двух щелей убедиться, что в пределах размеров пучка лазерное излучение пространственно когерентно, т.е.

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \geq 0,8$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  - интенсивности соседних максимума и минимума интерференционной картины.

7. Зная длину резонатора, оценить возможность генерации нескольких продольных мод, полагая ширину линии колебательно-вращательного перехода (в основном доплеровской)  $\sim 50$  МГц.

8. Из рис. 1 оценить квантовую составляющую КПД лазера в областях 9,6 и 10,6 мкм.

#### Контрольные вопросы:

1. Объяснить структуру колебательно-вращательных уровней энергии молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ . Привести выражения для определения их значений.
2. Полагая молекулы  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  в колебательных состояниях  $v=1$  и  $10^0$ , соответственно, гармоническими осцилляторами, вычислить константы  $k$  упругой связи ( $w_0^2 = k/m$ ).
3. Если в ТЕА- $\text{CO}_2$  лазере давление так высоко, что все вращательные линии перекрываются, какую длительность импульса можно получить в режиме синхронизации мод? Какое давление для этого необходимо?
4. Зачем в рабочую смесь  $\text{CO}_2$  лазера добавляют азот и гелий, иногда пары воды?
5. Почему уровни азота в возбужденных колебательных состояниях метастабильны? Как время их жизни зависит от давления?
6. Как диаметр газоразрядной трубки может влиять на мощность генерации  $\text{CO}_2$  лазера?
7. Объяснить ход зависимостей  $P(J)$  и  $\eta(J)$ .
8. Принцип работы калориметра ИМО - 2, основные составляющие погрешности измерений. Как рассчитать коэффициент ослабления аттенюатора?
9. Вычислить энергию квантов He - Ne и  $\text{CO}_2$  лазеров в джоулях, электрон - вольтах и обратных сантиметрах.
10. Начиная с какой длины волны арсенид галлия становится прозрачным для излучения (ширина запрещенной зоны  $E_g = 1,4$  эВ) ?
11. Показатель преломления AsGa  $n=3,1$ . Определить  $\phi_{\text{бр}}$ .