

5.2.3. Молекулярные лазеры

Атомные и ионные лазеры имеют низкий КПД, поскольку верхний лазерный уровень расположен достаточно высоко над основным и поэтому в процессе возбуждения принимает участие лишь небольшая доля от общего числа электронов. С точки зрения получения более высокого КПД газоразрядных лазеров необходимо, чтобы рабочие уровни были расположены по возможности ниже. В качестве таких уровней могут использоваться колебательные уровни молекул CO_2 , H_2O , D_2O , CH_3 , HCN . В связи с этим в 1960-х годах были начаты работы по получению генерации в широком диапазоне длин волн с молекулярными активными веществами и по разработке новых методов накачки.

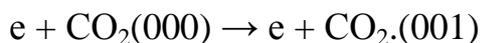
Первый молекулярный лазер был создан в 1964 г. в США С. Пателом на молекулах углекислого газа. Однако ещё в 1963 г. Н.Г. Басов и А.Н. Ораевский (ФИАН) показали, что накачку молекулярного лазера можно осуществить путём нагревания или охлаждения активной среды. Благодаря этой работе появилась возможность создания газодинамических лазеров, в которых активная газовая среда движется через оптический резонатор со сверхзвуковой скоростью. Тепловая энергия газа в форме колебательного движения молекул непосредственно преобразуется в энергию когерентного излучения.

5.2.3.1. CO_2 -лазер

Молекула CO_2 имеет три частоты собственных колебаний (рис. 5.25). Заселение соответствующих уровней в газовом разряде происходит в результате трёх основных процессов:

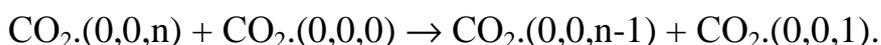
Накачка в CO_2 -лазере на верхний лазерный уровень $00^0 1$

1) Непосредственные столкновения с электронами. Очевидно, основной тип непосредственного столкновения, который следует рассмотреть, имеет вид:



Сечение столкновения с электроном для данного процесса очень велико и намного превышает соответствующее сечение возбуждения уровней 100 и 020 .

Прямой электронный удар может приводить также к возбуждению верхних $(0,0,n)$ колебательных уровней молекулы CO_2 . Однако молекула CO_2 быстро релаксирует с этих верхних состояний в состояние (001) посредством околорезонансных столкновений типа:



Данный процесс приводит к релаксации всех возбужденных молекул в состояние $(0,0,1)$. Благодаря этому процессу сразу достигается термализация колебательной энергии между состоянием $(0,0,1)$ и верхними

колебательными состояниями, и колебательную систему можно характеризовать колебательной температурой T_1 .

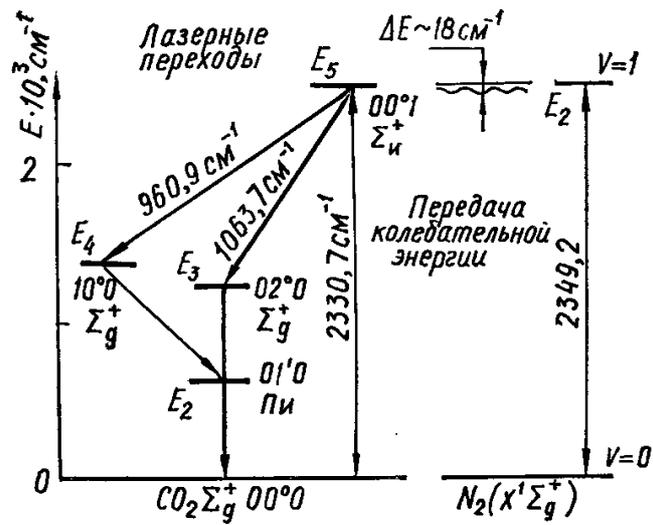


Рис. 5.25. Схема энергетических уровней молекул CO_2 и N_2

2) Резонансная передача энергии от молекулы N_2 . Этот процесс имеет также 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_2 из основного состояния на уровень $v = 1$ при столкновениях с электронами, причём уровень $v = 1$ является метастабильным.

Релаксация верхнего и нижнего лазерных уровней

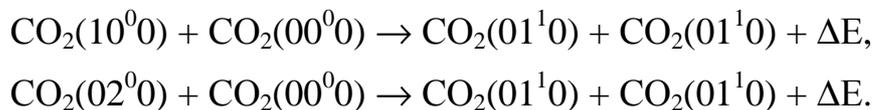
Хотя переходы $00^0 1 \rightarrow 10^0 0$, $00^0 1 \rightarrow 02^0 0$, $10^0 1 \rightarrow 01^0 0$ и $02^0 0 \rightarrow 01^0 0$ оптически разрешены, соответствующие времена релаксации $\tau_{\text{спон}}$ для спонтанного излучения очень малы (напомним, что $\tau_{\text{спон}} \sim 1/\nu^3$).

Релаксация различных указанных уровней в большей мере определяется столкновениями. В соответствие с этим время релаксации верхнего лазерного уровня τ_s можно определить по формуле типа

$$1/\tau_s = \sum a_i p_i \quad (5.6)$$

где p_i – парциальные давления, a_i – постоянные, характеризующие каждую компоненту газовой смеси в разряде. Рассматривая, например, случай, когда полное давление смеси равно 15 мм.рт.ст. (при парциальных давлениях $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ в отношении 1:1:8), мы находим, что время жизни верхнего лазерного уровня $\tau_s \approx 0,4 \text{ мс}$.

Что касается скорости релаксации нижнего уровня, то прежде всего заметим, что вероятность перехода $100 \rightarrow 020$ очень велика и этот переход происходит даже в изолированной молекуле. За счёт окolorезонансных процессов столкновения с молекулами CO_2 в основном состоянии уровни $10^0 0$ и $02^0 0$ эффективно взаимодействуют с уровнем $10^1 0$ (VV-релаксация):



Вероятность этих двух процессов очень большая, поскольку ΔE и $\Delta E'$ много меньше kT . Следовательно, населённости трёх уровней 10^0_0 , 02^0_0 и 01^1_0 достигают теплового равновесия за очень короткое время. Это равносильно утверждению, что населённости этих уровней можно описать колебательной температурой T_2 .

Время жизни уровня 01^1_0 определяется выражением (5.6), причём a_i для He много больше, чем для других частиц $\tau = 20$ мкс.

Таким образом, N_2 способствуют заселению верхнего лазерного уровня, а He – обеднению нижнего.

Вращательная структура

Правило отбора для двухатомных или линейных трёхатомных молекул требуют:

$$\Delta J = \pm 1 \quad (\Delta J = J'' - J'),$$

где $J'' - J'$ – вращательные квантовые числа нижнего и верхнего колебательных состояний).

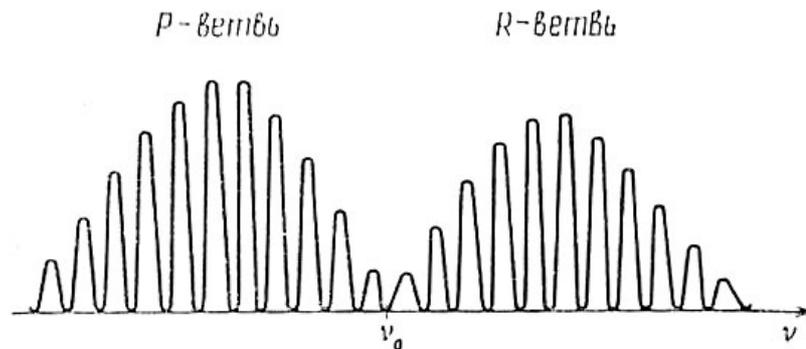


Рис. 5.26. Переходы между двумя колебательными уровнями с учётом вращательной структуры.

В отсутствие вращательной энергии этот переход должен был бы давать одну линию с центром в точке ν_0 . На самом деле он состоит из двух групп линий: одной, называемой P-ветвью и соответствующей переходам с изменением вращательного квантового числа на $\Delta J = +1$, и другой, называемой R-ветвью, соответствующей изменению вращательного квантового числа на $\Delta J = -1$

Наибольшую населённость среди вращательных уровней имеет уровень $J' = 21$ верхнего 00^0_1 состояния.

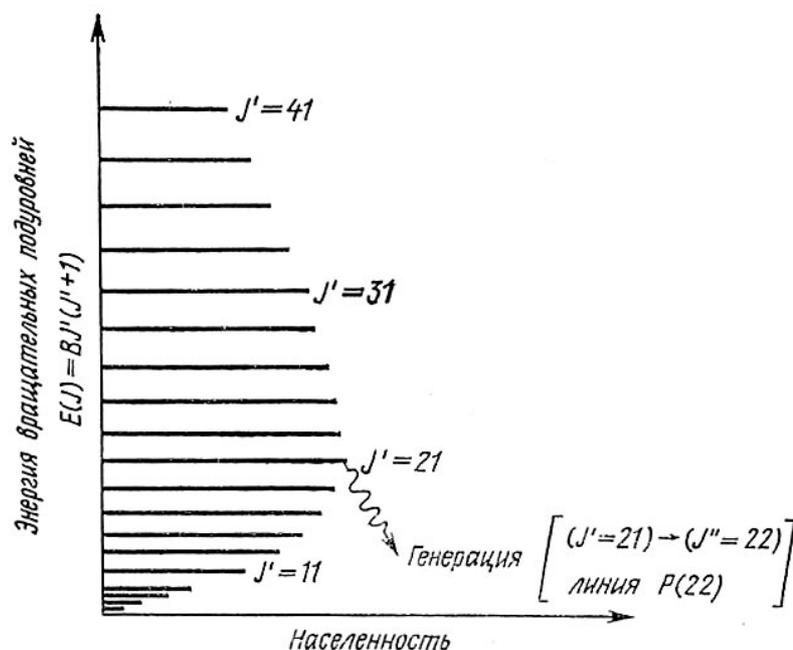


Рис. 5.27. Относительная населённость вращательных подуровней верхнего лазерного уровня молекулы CO_2

Таким образом при нормальных условиях генерация возникает на линии P(22) [т.е. $(J' = 21) \rightarrow (J'' = 22)$ перехода $(00^0_1) - (10^0_0)$. Другие линии выделяются селекцией].

Другими словами, индуцированное излучение в CO_2 -лазере вызвано переходами $E_5 \rightarrow E_4$ и $E_5 \rightarrow E_3$ (рис. 5.25). Наиболее интенсивным является переход $E_5 \rightarrow E_3$ с длиной волны 10,6 мкм, который может почти полностью подавлять лазерную генерацию на переходе $E_5 \rightarrow E_4$ на длине волны 9,6 мкм. Однако следует отметить, что спектр генерации в лазере на CO_2 очень сложен и генерация может возникнуть на большом числе переходов и иметь несколько сотен линий. Длины волн генерируемого излучения лежат в интервале 9,2-11,4 мкм в общем случае.

Конструктивно CO_2 -лазеры разделяются на семь типов и отличаются по скорости и направлению прокачки газовой среды, по величине её давления, а также механизмами и способами накачки. Все указанные лазеры имеют общую особенность, а именно высокий КПД (15-20%), который является следствием большого квантового выхода (~40%) и высокой эффективности процесса накачки. Рассмотрим их более подробно.

а) Лазеры с медленной продольной прокачкой

Впервые генерация в CO_2 -лазере была получена в лазере именно такого типа. Газовая смесь медленно прокачивается вдоль лазерной трубки для того, чтобы удалить продукты диссоциации, в частности CO, которые в противном случае загрязняют лазерную среду.

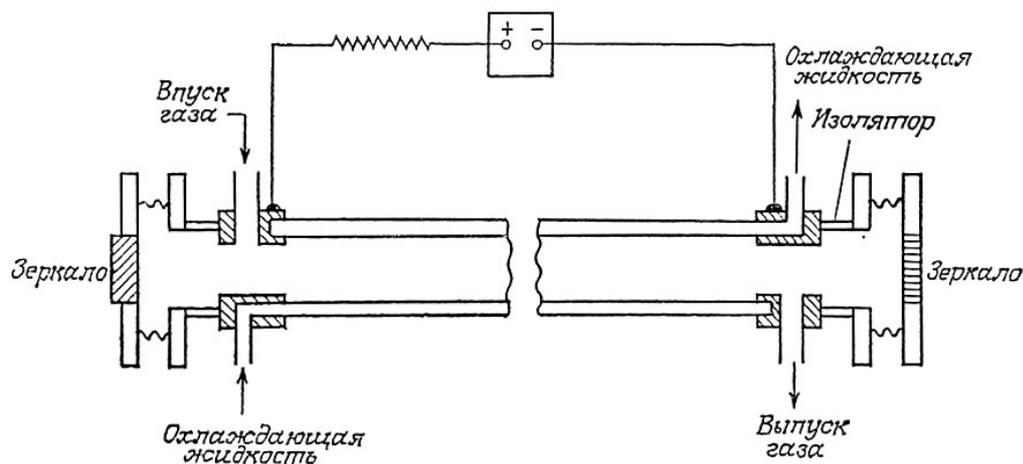


Рис. 5.28. Схематическое представление волноводного CO_2 -лазера с продольной прокачкой газа

Главным ограничением этого лазера является зависимость выходной мощности от единицы длины разряда (от длины резонатора - l):

$$W_{\text{л}} \approx I_p \cdot p \cdot D^2 \cdot l,$$

где D – диаметр активной среды, l – её длина, p – давление газа. При оптимальных значениях I_p и постоянном значении $p \cdot D = 22,5$ мм.рт.ст.·см величина выходной мощности прямо зависит от длины резонаторной трубки. Лазеры данной конструкции имеют относительно низкую мощность (50–100 Вт), для увеличения которой их делали очень длинными – до 100 м. Впрочем, этот недостаток удалось устранить, изготовив резонатор в свёрнутом виде, т.е. в виде многотрубной укладки, а электроды – в виде щётки или гребёнки по всей длине трубки. В этом случае удалось значительно сократить расстояния между электродами, а это, в свою очередь, позволило увеличить давление рабочей смеси (так как для поддержания устойчивого разряда в трубке требуется выполнение условия $p \cdot l = \text{const}$) и тем самым увеличить число активных центров. Такие усовершенствования привели к уменьшению размеров лазеров в сотни раз при сохранении мощности.

В лазерной технологии квантовые генераторы такой конструкции используются для подгонки резисторов, для резки керамических пластин в электронной промышленности, а также для сварки тонких металлических пластин (<1 мм).

б) Лазеры с быстрой продольной прокачкой

В таких конструкциях газовая смесь прокачивается со сверхзвуковой скоростью (около 50 м/с), что даёт возможность охлаждать её путём быстрого удаления смеси из рабочей зоны в охладитель и тем самым преодолеть ограничение на выходную мощность. Прокачка с большой скоростью означает увеличение количества активных центров, что позволяет увеличить ток I_p и тем самым $W_{\text{л}}$ (так как $W_{\text{л}} \sim I_p$). В современных лазерах достигнуты параметры по мощности ~ 1 кВт/м и больше. За пределами

резонатора газ не только охлаждается, но и проходит необходимую генерацию в присутствии катализатора:

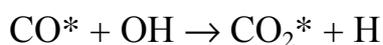


В этом режиме лазер работает практически автономно.

В настоящее время CO_2 -лазеры с быстрой продольной прокачкой мощностью 1-3 кВт нашли широкое применение во многих операциях по обработке и термообработке материалов и, в частности, для лазерной резки металлов (с толщиной до нескольких миллиметров).

в) Отпаянные CO_2 -лазеры

В отпаянных лазерах для регенерации молекул CO_2 из CO в газоразрядную камеру помещается катализатор, для чего в газовую смесь помещают небольшое количество воды (~1 %). Регенерация идет по следующей реакции:



(CO^* и CO_2^* – колебательно-возбужденные молекулы). Иногда роль катализатора выполняет нагретый до 300 °С никелевый катод. Долговечность этих лазеров $\approx 10^4$ часов, $W_{\text{л}} = 60$ Вт/м. Отпаянные CO_2 -лазеры, как правило, применяют для механической обработки материалов микрорезанием.

г) CO_2 -лазеры с поперечной прокачкой (ТЕ-лазеры)

Снять ограничения на мощность, присущую лазеру с медленной продольной прокачкой, можно, если прокачивать газовую смесь перпендикулярно разряду. Если смесь прокачивать достаточно быстро, то можно решить проблему с охлаждением. В этом типе лазеров мощность с единицы длины разряда достигает нескольких киловатт на метр. Оптимальное общее давление ~ 100 мм.рт.ст. (что на порядок больше, чем в системах с продольной прокачкой). В связи с этим схема с продольным разрядом, применяемая в лазерах, описанных выше, неприемлема, так как для выполнения $U/p = \text{const}$ (U – приложенное напряжение) потребовались бы электрические поля ≈ 100 -500 кВ/м. Поэтому делают так, чтобы разряд протекал перпендикулярно оси резонатора. Эти лазеры в литературе получили название «ТЕ-лазеры». ТЕ CO_2 -лазеры обладают высокой выходной мощностью (1–20 кВт), широко применяются в технологических операциях, связанных с обработкой металлов (резание, сварка, поверхностная закалка, поверхностное легирование металлов и т.д.) и имеют довольно простую конструкцию (см. рис. 5.29).

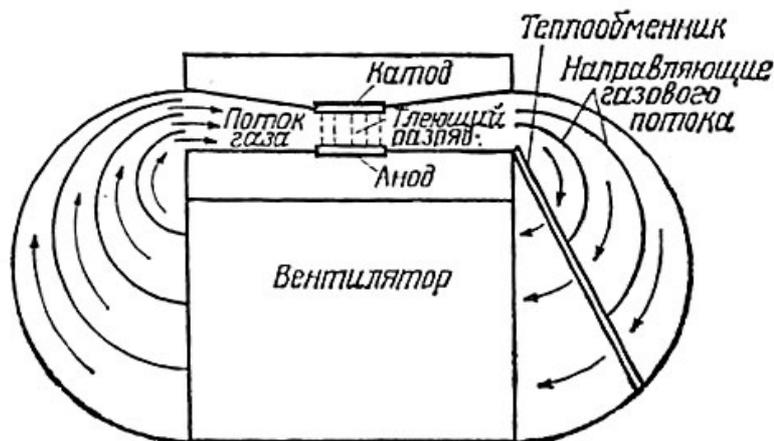


Рис. 5.29. Схема устройства CO_2 -лазера с поперечной прокачкой

д) Волноводные лазеры

Если диаметр лазерной трубки уменьшить до нескольких миллиметров (2–4 мм), то лазерное излучение в трубке распространяется как в волноводе. Такие волноводные CO_2 -лазеры имеют низкие дифракционные потери. Главным преимуществом волноводного CO_2 -лазера является то, что благодаря небольшому диаметру отверстия давление смеси должно быть высоким (100–200 мм.рт.ст.). Типичная средняя мощность $W = 50$ Вт/м.

е) CO_2 -лазеры атмосферного давления с поперечным возбуждением

В непрерывных ТЕ CO_2 -лазерах нелегко поднять давление выше ~100 мм.рт.ст. В тлеющем разряде выше этого давления и при обычно используемых плотностях тока возникают неустойчивости, которые приводят к образованию дуги в объеме разряда. Для преодоления этого осложнения к электродам, между которыми происходит поперечный разряд, прикладывают импульсное напряжение.

Если длительность импульса достаточно мала (доля микросекунды), то неустойчивости в разряде не успеют развиваться и, следовательно, рабочее давление газа можно повысить вплоть до атмосферного и выше. Эти лазеры называются ТЕА-лазерами (аббревиатура англ. слов *transversely excited at atmospheric pressure*).

Энергосъем с единицы объема разряда составляет 10–50 Дж/л и сегодня ТЕА-лазеры являются одними из мощнейших генераторов.

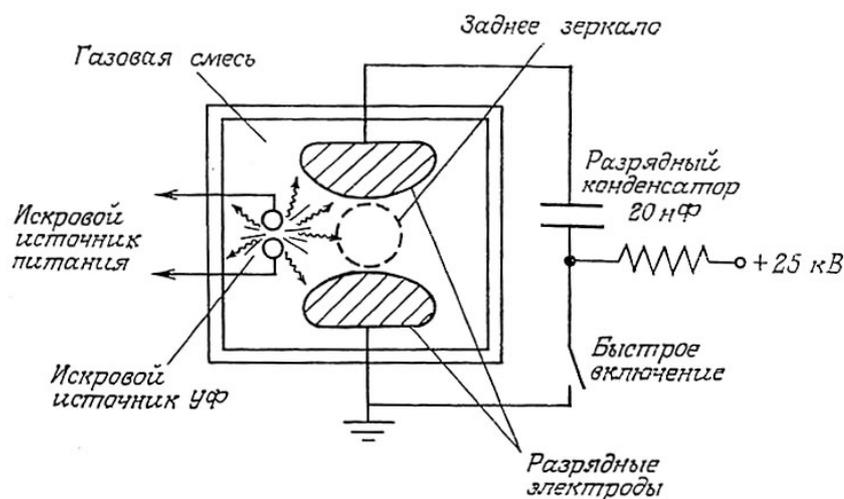


Рис. 5.30. Схематическое представление (вид вдоль лазерной оси) лазера, накачиваемого поперечным разрядом с использованием УФ-излучения от искрового источника для предыонизации газа

ж) Газодинамический CO_2 -лазер

Газодинамический CO_2 -лазер заслуживает особого внимания, поскольку инверсия населённостей в нём создаётся не электрическим разрядом, а за счёт быстрого расширения газовой смеси, содержащей CO_2 , предварительно нагретой до высокой температуры. Инверсия населённостей возникает в потоке в области расширения.

Принцип действия газодинамического лазера можно кратко описать следующим образом (см. рис. 5.31). Предположим, что вначале газовая смесь находится при высокой температуре (например, $T = 1400 \text{ K}$) и высоком давлении (например, $p = 17 \text{ атм}$) в соответствующем резервуаре. Поскольку газ первоначально находится в термодинамическом равновесии, у молекулы CO_2 будет большой населённость уровня 00^0_1 (порядка 10 % населённости основного состояния). Разумеется, по сравнению с этой населённостью нижнего уровня является более высокой (~25 %), и, следовательно, инверсия населённостей отсутствует. Предположим теперь, что газовая смесь истекает через какие-то сопла (рис. 5.31в). Поскольку расширение является адиабатическим, температура поступательного движения смеси становится очень низкой. За счёт VT-релаксации населённости как верхнего, так и нижнего лазерных уровней будут стремиться к новым равновесным значениям. Однако, поскольку время жизни верхнего уровня больше времени жизни нижнего, релаксация нижнего уровня произойдет на более ранней стадии процесса расширения (рис. 5.31). Таким образом, ниже по потоку от зоны расширения будет существовать достаточно широкая область с инверсией населённостей. Протяжённость этой области L приближённо определяется временем, необходимым для передачи возбуждения от молекулы N_2 молекуле CO_2 . При этом оба лазерных зеркала выбирают прямоугольной формы и их располагают так, как показано на рис. 5.31в. Такой способ создания инверсии населённостей будет эффективным лишь в

том случае, когда в процессе расширения температура и давление смеси понижаются за время, которое 1) мало по сравнению с временем жизни верхнего лазерного уровня и 2) велико по сравнению с временем жизни нижнего лазерного уровня. Чтобы удовлетворить этим условиям, расширение должно проходить со сверхзвуковыми скоростями. [Звелто О. Принципы лазеров / Пер. с англ. – 3-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1990. – С. 375–377.]

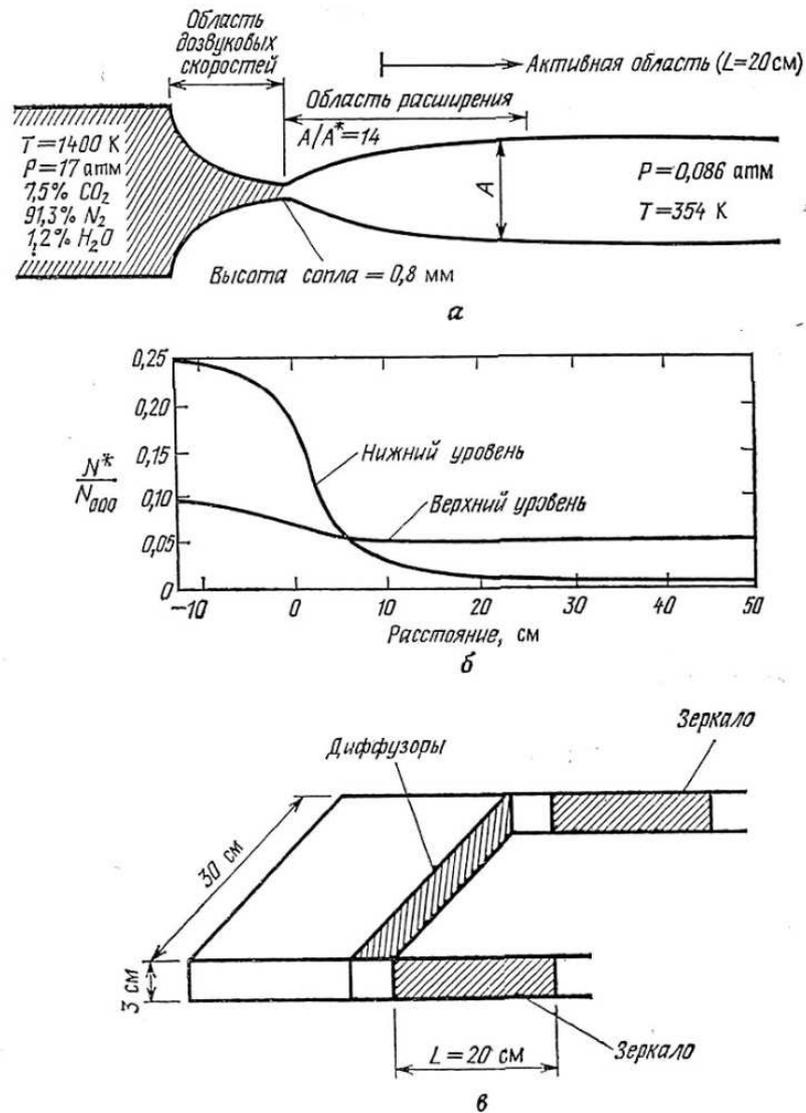


Рис. 5.31. Схема, иллюстрирующая работу газодинамического CO_2 -лазера: а – принцип действия устройства; б – пространственное распределение населённости N^* верхнего и нижнего лазерных уровней (нормированной на населённость основного уровня N_{000}); в – геометрия

5.2.3.2. CO-лазер

Молекулярный лазер на окиси углерода (CO) обладает существенными особенностями, которые отличают его от других молекулярных лазеров, хотя он, как и CO_2 -лазер, работает на колебательно-вращательных переходах в основном электронном состоянии. Структура колебательных энергетических уровней молекулы CO характеризуется небольшой ангармоничностью, т.е. энергия, отдаваемая молекулой, находящейся в нижнем энергетическом

состоянии, несколько превышает (на величину ΔE) энергию, которую способна принять молекула, находящаяся в верхнем энергетическом состоянии.

Из-за уменьшения расстояния между соседними уровнями вероятность столкновения с передачей энергии возбуждения от частиц, находящихся на нижних энергетических уровнях, к частицам на верхних уровнях превышает вероятность обратного процесса, требующего преодоления энергетического барьера, равного ΔE . Лазерная генерация может возникнуть между произвольной парой энергетических уровней, если система находится в состоянии инверсии. Конечное состояние одного лазерного перехода может служить начальным состоянием для другого. Молекула СО на нижнем лазерном уровне может быть снова возбуждена при соударении, а её возврат в основное состояние, которое в общем случае находится ниже уровней лазерных переходов, не является необходимым условием. Вследствие этого в излучение может быть переведено свыше 90 % энергии, получаемой средой от системы накачки. Каскадный характер переходов приводит к некоторому разбросу длин волн генерации, в результате чего СО-лазер одновременно работает в целой спектральной полосе 5–6,5 мкм.

Эффективность активной среды зависит от её температуры (температура кипения СО равна 83 К), при температуре большей 400 К инверсию получить почти невозможно. Рабочая смесь СО-лазеров помимо СО включает молекулы Аг, N₂, Не, О₂.

Способы возбуждения СО-лазеров практически не отличаются от СО₂-лазеров. Они эффективно накачиваются при самостоятельном и несамостоятельном разряде, а также при глубоком охлаждении в сверхзвуковом потоке.

К недостаткам активных сред на основе молекулы СО, наряду с низкими температурами для их эффективного использования, следует отнести токсичность рабочей смеси, что требует принятия специальных мер защиты. [Борейшо А.С. Лазеры: устройство и действие: учеб. пособие // Мех. ин-т. – СПб., 1992. – 215 с.]