

ЛЕКЦИЯ 11. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ CO₂-ЛАЗЕРОВ

В этих генераторах используется специальная смесь газов CO₂, N₂ и He. Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы CO₂, а N₂ и He служат для повышения КПД. Эти лазеры сейчас являются одними из самых мощных (примерно 80 кВт) и достаточно эффективных (КПД ~ 15 - 20%). Длины волн генерации составляют 10,6 и 9,5 мкм.

На рис.1 приведена схема энергетических уровней основных электронных состояний молекулы CO₂. Эта молекула имеет три невырожденные колебательные моды (рис.2.5): 1) симметричную валентную моду (ν_1), 2) деформационную моду (ν_2), 3) асимметричную валентную моду (ν_3) и описывается квантовыми числами n_1 , n_2 и n_3 , которые определяют число квантов в каждой колебательной моде.

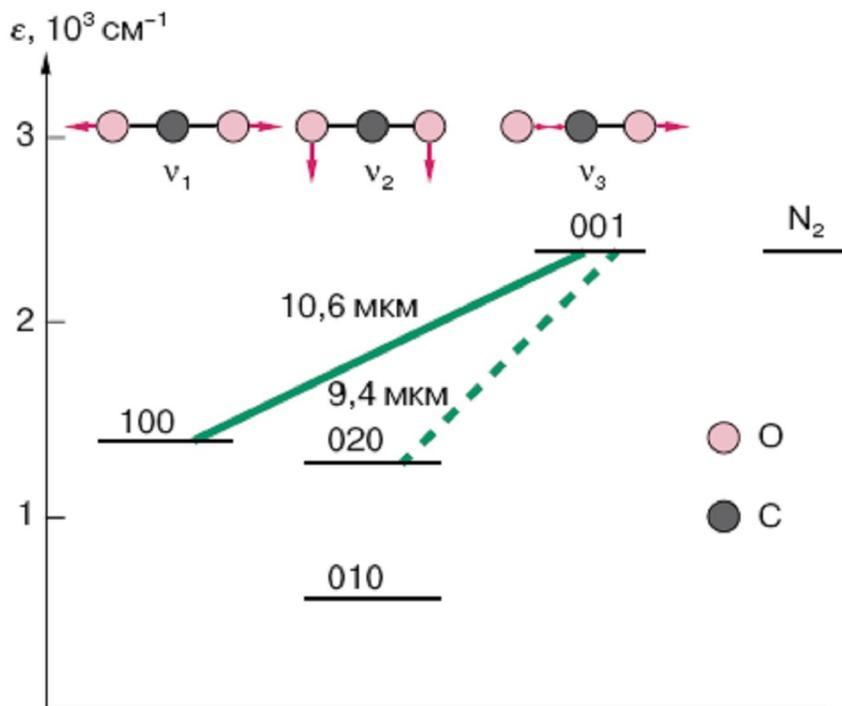


Рис.1. Колебательные уровни основных электронных состояний CO₂ и переход в молекуле N₂. Три фундаментальные моды колебаний молекулы CO₂: ν_1 - симметричная валентная мода; ν_2 - деформационная мода; ν_3 - асимметричная валентная мода.

1. Коэффициент полезного действия CO₂-лазеров.

Полны КПД $\rightarrow \eta$ - отношение мощности излучения лазера к полной затраченной электрической мощности определяется, как:

$$\eta = \eta_{\text{кв}} \eta_{\text{к}} \eta_{\text{опт}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{со}}$$

где $\eta_{\text{кв}}$ - квантовый КПД, равный отношению энергии кванта к энергии верхнего лазерного уровня, равный 41%;

η_k – колебательный КПД, т.е. доля мощности, выделяющаяся в положительном столбе разряда, затраченная на возбуждение колебательных уровней 00^0_1 молекул CO_2 и $n_v = 1$ молекул азота;

$\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД, равный доле мощности колебательно возбужденных молекул CO_2 , перешедших в основное состояние в результате процессов вынужденного излучения, выведенной из резонатора;

η_p – КПД системы разряда, равный отношению электрической мощности, выделяемой в положительном столбе разряда к мощности источников питания;

$\eta_{\text{со}}$ – КПД системы обслуживания, учитывающий КПД источников питания, а также затраты на создание газового потока, поддержание рабочего давления в разрядных камерах и систему охлаждения.

Для оценки эффективности лазерных систем часто используют электрооптический КПД:

$\eta_{\text{эо}} = \eta_{\text{кв}} \eta_k \eta_{\text{опт}}$, определяемый, как отношение мощности излучения лазера к электрической мощности, выделяемой в положительном столбе разряда

2. Классификация мощных CO_2 -лазеров.

а)- по типу охлаждения: лазеры с диффузионным (ЛДО) и конвективным (БПЛ – быстропроточные лазеры) охлаждением.

б) – по типу газодинамической схемы: лазеры с открытым и закрытым контуром.

в)- по направлению тока разряда: с продольным и поперечным разрядом.

г) – БПЛ- по направлению движения газовой смеси: с продольной и поперечной прокачкой.

д) – по способу получения инверсии: с самостоятельным разрядом постоянного тока;

не самостоятельным разрядом: поддерживаемым пучком электронов (ЭИЛ-лазеры), поддерживаемым периодическими импульсами ионизации (комбинированный разряд), разряд переменного тока (ВЧ).

е)-по временным характеристикам: непрерывные лазеры, импульсные лазеры, импульсно-периодические лазеры.

3. Непрерывные CO_2 - лазеры с диффузионным охлаждением.

В таких системах газовая смесь медленно прокачивается вдоль охлаждаемой лазерной трубки для удаления продуктов диссоциации, например CO , и отвода тепла через стенки резонатора. Главным ограничением этого лазера является зависимость выходной мощности от единицы длины разряда (от длины резонатора - l). Удельный энергосъем $\langle jE \rangle_{\text{од}}$ за счет диффузии тепла к охлаждаемым стенкам трубки можно оценить из стационарного баланса тепла в разряде:

$$\langle jE \rangle_{\text{од}} \leq \kappa_e (T_{\text{опт}} - T_{\text{ст}}) / \Lambda^2,$$

Где $\kappa_e = c\rho D$ – теплопроводность газовой смеси, $T_{\text{ст}}$ – температура стенки трубки, $T_{\text{опт}}$ – оптимальная температура газовой смеси, D – коэффициент диффузии, $\Lambda = R/2,4$ – характерный размер, определяющий теплоотвод в цилиндрической трубке радиуса R . (см. схему ЛДО- лазера на рис. 2.)

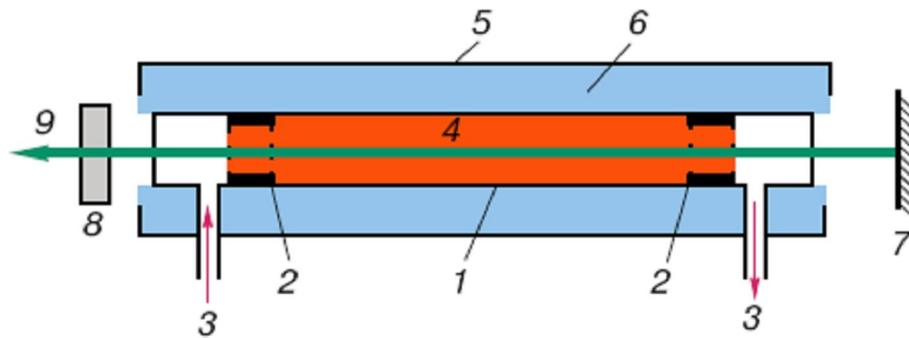


Рис. 2. Схема ЛДО- лазера: 1- разрядная трубка, 2 – кольцевые электроды, 3 – медленное обновление смеси, 4 – разрядная плазма, 5 – внешняя трубка, 6 – охлаждающая проточная вода, 7- глухое зеркало, 8 – полупрозрачное зеркало, 9 – выходящее излучение.

Отсюда оцениваем максимальное значение мощности, снимаемое с единицы длины ЛДО:

$$(P/L)_d \leq 50-100 \text{ Вт/м.}$$

Т.е. для получения мощности около 1 кВт необходимо последовательное соединение трубок в единый контур (см. рис. 3)

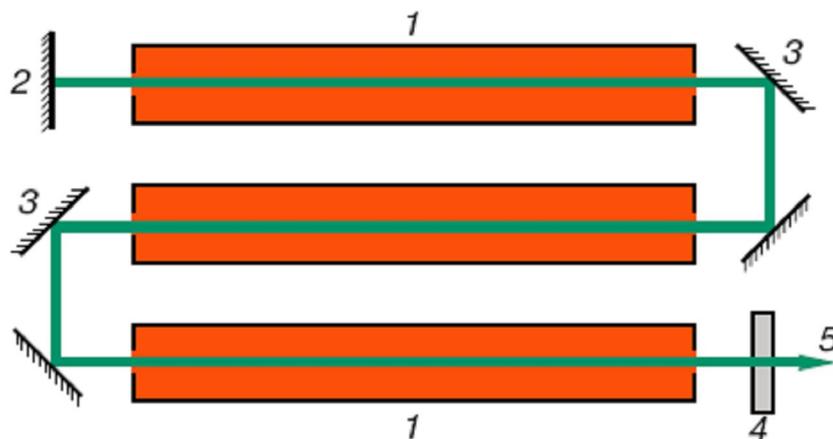


Рис. 3 Последовательное включение нескольких трубок в резонатор: 1- разрядные трубки, 2 – глухое зеркало, 3 – поворотные зеркала, 4 – выходное полупрозрачное зеркало, 5 – выходящее излучение.

Полагая $R \sim 1-3$ см получаем, что для предельной возможной длины набора трубок предельная мощность ЛДО-лазера составляет $P \leq (0,25 - 2,5)$ кВт.

4. Непрерывные CO₂ - лазеры с продольной прокачкой.

В таких конструкциях газовая смесь прокачивается со сверхзвуковой скоростью, что дает возможность охлаждать ее путем 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 средний ток $\langle j \rangle$ и тем самым снимаемую мощность $W_{л}$ (так как $W_{л} \sim \langle j \rangle$). В современных лазерах достигнуты параметры по мощности ~ 1 кВт/м и больше. За пределами резонатора газ не только охлаждается, но и проходит необходимую генерацию: $2\text{ CO} + \text{O}_2 = 2\text{ CO}_2$ в присутствии катализатора. В этом режиме лазер работает практически в автономном режиме. В настоящее время CO₂ - 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).

5. Непрерывные CO₂ - 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 условия $U/p = \text{const}$ (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 CO₂ - лазеры обладают высокой выходной мощностью (1-20 кВт) и 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. 4).

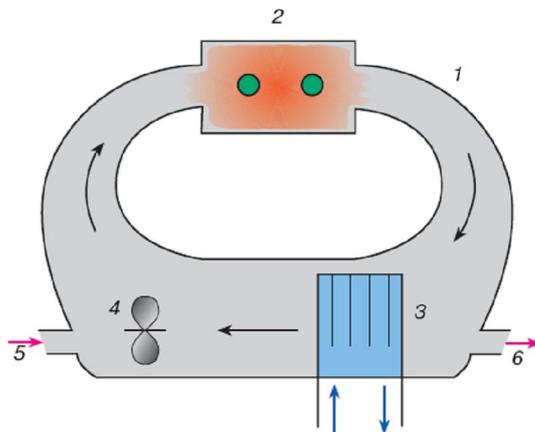


Рис. 4 CO₂ - лазеры с поперечной прокачкой (БПЛ): 1- газовый контур, 2 – разрядная камера с резонатором, 3 – теплообменник, 4 – вентилятор, 5 – медленный напуск свежей смеси, 6 – медленная откачка отработанной смеси.

На рисунке 5 представлена схема разрядной камеры быстропроточного лазера с поперечной прокачкой.

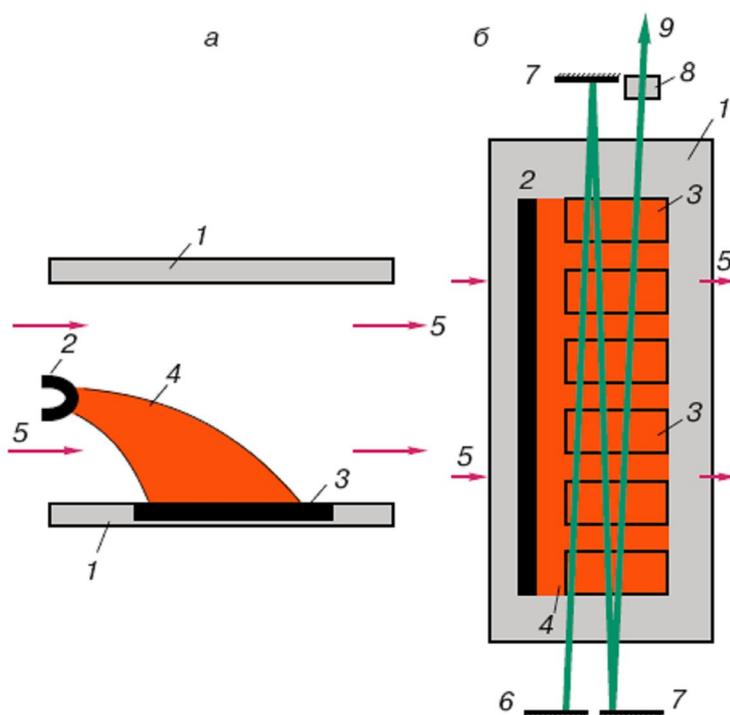


Рис. 5 Схема разрядной камеры и резонатора БПЛ-лазера. а) – вид сбоку; б) – вид сверху. 1- стенка камеры, 2 – сплошной катод, 3 – секционированный анод, 4 – разрядная плазма, 5 – газовый поток, 6- глухое зеркало, 7 – поворотное зеркало, 8 – выходное окно, 9 – выходящее излучение.

б. CO₂ - лазеры атмосферного давления с поперечным возбуждением (ТЕА-лазеры).

В этом лазере претворена в жизнь идея о том, как еще больше увеличить p по сравнению с ТЕ СО₂ - лазерами. Для этого наряду с увеличением давления рабочего газа к электродам прикладывают импульсное напряжение ($t = 10^{-6}$ с). В этом случае исчезает опасность появления дугового разряда, так как не успевают развиваться неустойчивости. Рабочее давление увеличивают вплоть до атмосферного. Эти лазеры называются ТЕА - лазерами. Энергосъем с единицы объема разряда составляет 10-50 Дж/л и сегодня ТЕА-лазеры являются одними из мощнейших генераторов. Принципиальным решением при разработке этой системы является создание определенного предварительного состояния рабочей среды, называемого предыонизацией, перед основным возбуждающим систему импульсом. Предыонизация осуществляется одним из трех способом: 1) УФ - предыонизация за счет фотоионизации составляющих рабочей смеси искровым пробоем; 2) предыонизация электронным (импульсным) пучком; 3) - коронная предыонизация за счет использования коронного разряда. В зависимости от частоты импульсов рабочая среда может прокачиваться или не прокачиваться. Лазеры такого типа (как источники мощного импульсного излучения) нашли применение в скоростных методах обработки материалов, когда импульсный характер пучка дает преимущества, например, импульсная маркировка, импульсная сварка и т.д..

7. Мощные CO₂-лазеры с несамостоятельным разрядом.

Несамостоятельный тлеющий разряд постоянного тока с ионизацией импульсно-периодическим разрядом (РПТ-ИР) используется для создания активной среды в электроразрядных технологических CO₂-лазерах с быстрым поперечным протоком газа с непрерывной мощностью от 1 до 40 кВт. В используемых схемах напряжение импульсно-периодического разряда и напряжение несамостоятельного разряда (постоянное или также импульсное) подаются на одни и те же электроды. Пространственная однородность разряда в этом случае обеспечивается путем секционирования электродов, а также введением дополнительной предыонизации. В других схемах напряжение самостоятельного импульсно-периодического разряда прикладывается к дополнительной паре электродов, представляющих собой металлические пластины большой площади, изолированные от разрядного промежутка слоями диэлектрика. Этот тип вспомогательного разряда называется безэлектродным (или емкостным) импульсно-периодическим разрядом (ЕИР), или емкостной импульсной предыонизацией. Для ЕИР характерна высокая импульсная мощность, необходимая для того чтобы создать однородную ионизацию в разрядном объеме, заключенном между диэлектрическими пластинами, при сравнительно низкой средней по времени мощности. Возбуждение колебательных степеней свободы молекул в однородно ионизированной среде осуществляется стационарным несамостоятельным основным разрядом, который можно охарактеризовать как разряд постоянного тока с ионизацией безэлектродным (емкостным) импульсно-периодическим разрядом (РПТ-ЕИР). Постоянное напряжение основного разряда прикладывается к металлическим электродам в форме трубок (катода и анода), расположенных на входе и выходе газового потока в разрядной камере. Поток направлен от катода к аноду, перпендикулярно оптической оси резонатора. Две оставшиеся стенки разрядной камеры имеют отверстия для выхода излучения к зеркалам, расположенным снаружи. Проходы многопроходного оптического резонатора расположены Z-образно для лучшего заполнения излучением объема разрядной камеры. На базе этой схемы был спроектирован ряд промышленных CO₂-лазеров “Лантан” мощностью от 1,5 до 5 кВт. Кроме того, была создана экспериментальная лазерная установка “Циклон” мощностью 10 кВт. Эти лазеры отличаются высоким КПД, хорошим качеством излучения, широкими возможностями для управления мощностью, низким потреблением рабочих газов и высокой надежностью. Высокие эксплуатационные характеристики этих лазеров достигнуты благодаря особенностям применяемой схемы РПТ-ЕИР: оптической однородности, простой электродной системе, низкой плазмохимической активности и оригинальной схеме управления мощностью основного разряда