

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ДВУОКСИ УГЛЕРОДА *)

К. Пател

Еще совсем недавно полагали, что наиболее мощными будут лазеры на твердом теле, по той простой причине, что в твердом теле концентрация активных частиц выше, чем в газе. Тем не менее с самого начала стало ясно, что твердотельные лазеры имеют ряд недостатков. Их качество по сравнению с газовыми лазерами значительно ниже с точки зрения двух основных критериев — спектральной чистоты и пространственной когерентности. Более того, большинство лазеров на твердом теле работает только в импульсном режиме, другими словами, их выходная мощность сосредоточена в короткой интенсивной вспышке света, а не в непрерывном пучке. В противоположность им уже первые газовые лазеры давали непрерывные пучки света великолепной спектральной чистоты и пространственно когерентные, однако их выходная мощность была очень низка по сравнению с лазерами на твердом теле.

Ситуация существенно изменилась с появлением молекулярно-газовых лазеров. Ярким примером этого нового класса лазеров служит лазер на двуокиси углерода, который может давать непрерывное излучение с выходной мощностью в несколько киловатт, сохраняя высокую степень спектральной чистоты и пространственной когерентности, характерные для маломощных лазеров на атомарных газах. Недавно с помощью лазера на CO_2 в непрерывном режиме получено инфракрасное излучение 8,8 *квт* — наиболее мощное на сегодняшний день для такого типа лазеров. Значительность такой выходной мощности ярко демонстрируется тем фактом, что сфокусированный инфракрасный луч в несколько киловатт за секунды прожигает четвертьдюймовую стальную пластину (рис. 1).

В силу своей высокой выходной мощности в инфракрасной области спектра лазер на CO_2 открыл целую новую область длин волн для исследования неразрушающих оптических взаимодействий с газами, жидкостями и твердыми телами. Такие оптические взаимодействия включают и нелинейные процессы, посредством которых можно получить когерентный источник инфракрасного излучения с непрерывной перестройкой

*) С. К. N. Patel, High Power Carbon Dioxide Lasers, Sci. American 219 (2), 24 (1968). Перевод Т. Н. Болотниковой.

В журнале «Успехи физических наук» уже были помещены статьи о лазерах на CO_2 , однако они по объему и характеру предназначены для специалистов. Редакция считает целесообразным опубликовать перевод статьи К. Патела для ознакомления широких кругов физиков с важным успехом в области лазерной техники, тем более, что разработка лазера на CO_2 принадлежит именно автору предлагаемой статьи. (Ред.)

в некоторой области частот. Существуют и другие возможности использования мощного лазера на CO_2 . Возможно, наиболее перспективно его применение в области оптических коммуникаций и оптической локации. В частности, лазер на CO_2 годится для использования как в наземной, так и во внеземной системах связи, поскольку генерируемый им инфракрасный луч лишь слегка поглощается атмосферой. В настоящей статье я попытаюсь объяснить физические основы действия этого нового типа мощного газового лазера.

В общих чертах газовый лазер состоит из наполненного газом при низком давлении сосуда (называемого лазерной трубкой), помещенного между

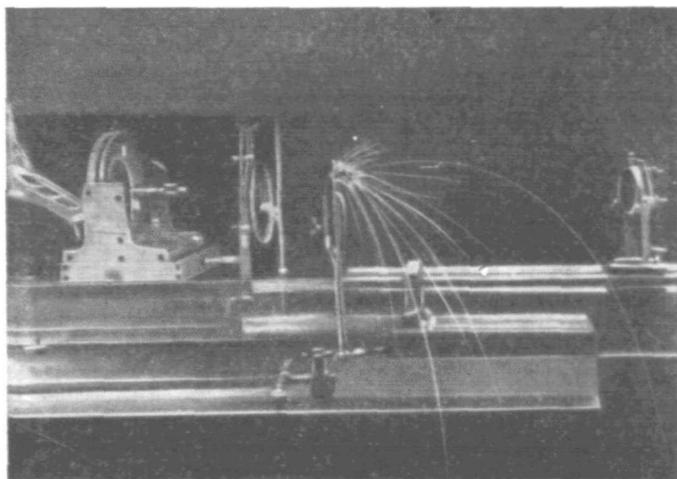


Рис. 1. Сверхмощный инфракрасный луч лазера на двуокиси углерода прожигает отверстие в четвертьдюймовой пластинке нержавеющей стали — операция требует около 10 сек. Инфракрасный луч проходит в конце лазерной трубки через окно под углом Брюстера (слева), а затем через полупрозрачную пластинку падает на вогнутое зеркало (справа) и фокусируется на стальную пластинку (в центре).

двумя зеркалами, которые образуют оптический резонатор. Газ в трубке (называемый лазерной средой) состоит из атомов, паров металла или молекул. Обычно эффект генерации в газах возникает в результате электрического разряда; быстрые электроны, существующие в разряде, сталкиваются с активными частицами газа, возбуждают их на вышележащие энергетические уровни, с которых они спонтанно переходят на нижние уровни, излучая энергию в форме фотонов. Для того чтобы получить оптическое усиление, характеризующее лазерный эффект, необходимо, чтобы плотность частиц на верхнем энергетическом уровне была больше, чем на нижнем. Это условие известно как инверсия заселенностей, так как оно обратное нормальному или равновесному распределению частиц по уровням.

Для достижения высокой мощности излучения при переходах между определенной парой энергетических уровней необходимо также, чтобы абсолютное число атомов, возбужденных на верхний уровень, было достаточно велико и чтобы частицы газа покидали нижний уровень как можно скорее, после того как они туда попали из верхнего состояния. Другими словами, «расселение» нижнего уровня столь же важно, как и возбуждение частиц на верхний уровень, так как частицы, которые уже внесли свой вклад в излучение, должны быстро вернуться в основное состояние, чтобы затем снова возбудиться на верхний уровень, и т. д. Энергия, отдаваемая частицами при переходе с нижнего лазерного уровня в основ-

ное состояние, не входит в выходную мощность излучения лазера, т. е. на каждую частицу, участвующую в лазерном переходе приходится определенное количество потерянной энергии. Этот факт подсказывает очевидный путь для оценки эффективности конкретной лазерной системы. Количество энергии, теряемой частицей при возвращении ее с нижнего лазерного уровня в основное состояние, равно разности между энергией, необходимой для возбуждения частицы на верхний лазерный уровень, и энергией фотона, излучаемого при лазерном переходе. Отсюда следует, что отношение этих двух квантов — энергия излучения, деленная на энергию возбуждения, — и есть мера эффективности данной лазерной системы. Естественно, что ситуация, при которой каждая возбужденная частица дает фотон лазерного излучения, идеальна, так как при этом предполагается, что для девозбуждения частиц с верхнего лазерного уровня не существуют никакие другие механизмы, такие, например, как переходы на другие ниже лежащие уровни. Поэтому отношение энергий фотонов излученного и возбуждающего в действительности является абсолютным максимумом к. п. д. (выхода) лазерной системы, называемым также квантовым к. п. д.

Практически к. п. д. действующих газовых лазеров значительно ниже квантового к. п. д., так как не существует совершенных способов избирательного возбуждения газовых частиц из основного состояния на верхний лазерный уровень. Возьмем случай возбуждения за счет столкновения атома и быстрого электрона в газовом разряде. Чтобы возбудить атом, электрон должен обладать определенной энергией. К сожалению, в газовом разряде электроны не обладают одинаковой кинетической энергией, а ее значения распределены в широком интервале величин. Поэтому часть электронов не может возбудить атомы не только на верхний лазерный уровень, но и на другие уровни (расположенные выше или ниже) и, следовательно, не будет вносить вклад в выходную мощность лазера. В результате для возбуждения атомов на верхний лазерный уровень используется только часть мощности электрического разряда. Если мы определим рабочий к. п. д. лазера как отношение выходной мощности лазерного пучка к входной мощности электрического разряда, то ясно, что рабочий к. п. д. всегда значительно ниже квантового. Чем ближе лазер к идеальной системе в смысле избирательности механизма возбуждения, тем меньше различие между рабочим и квантовым к. п. д. Другими словами, для получения высокого рабочего к. п. д. в реальных системах высокий квантовый к. п. д. должен сочетаться с избирательным механизмом возбуждения. Первый газовый лазер сконструирован в «Bell Telephone Laboratories» в 1961 г. Он работает на переходе между двумя возбужденными состояниями атомов неона и дает сильное лазерное излучение с длиной волны 1,15 мкм. С тех пор лазерный эффект получен почти на всех элементах и перекрывает область длин волн от 2000 Å (0,2 мкм) в ультрафиолетовой части спектра до 133 мкм в инфракрасной области.

Энергетический спектр молекулярных газов значительно сложнее, чем атомарных. Кроме обычных электронных уровней энергии, молекулы имеют уровни энергии, обусловленные колебательным и вращательным движением молекулы. Скажем, для данной электронной конфигурации двухатомной молекулы имеется несколько почти равностоящих друг от друга колебательных уровней энергии, а для каждого колебательного уровня — ряд вращательных. Расстояние между электронными уровнями молекулы того же порядка величины, что и для атомов, а интервалы между колебательными и вращательными уровнями, как правило, меньше соответственно приблизительно в 20 и 500 раз. В результате схема энергетических уровней молекулярного газа крайне усложняется (рис. 2).

В первых лазерах на молекулярном газе использовались электронные переходы ряда двухатомных молекул. Очевидно, однако, что можно исполь-

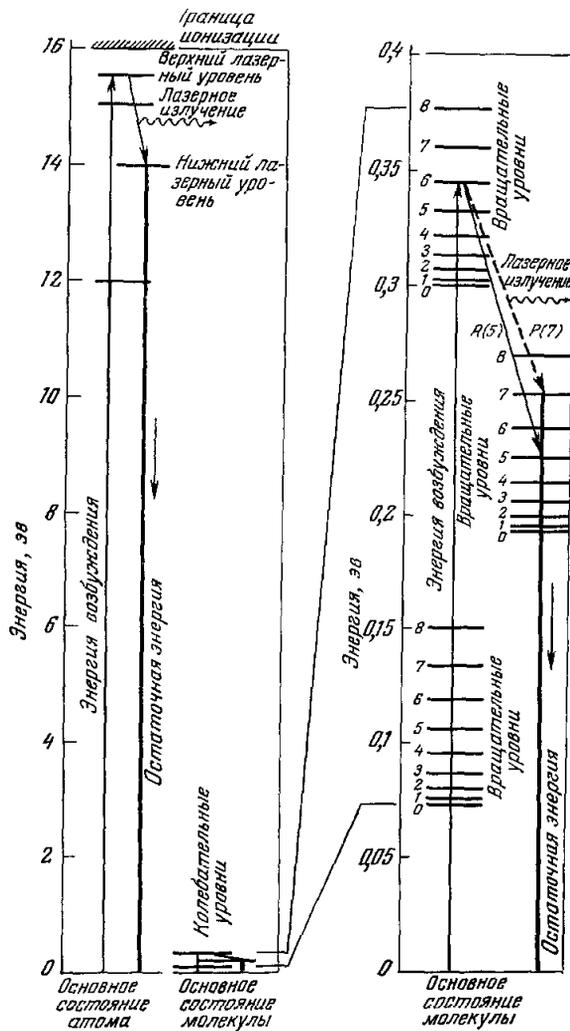


Рис. 2. Сравнительные диаграммы уровней энергии атома и молекулы. Атомные электронные уровни энергии, между которыми осуществляются переходы в инфракрасной области, расположены вблизи границы ионизации атома — высоко над основным состоянием атома. Поэтому для получения лазерного эффекта атом должен быть возбужден до очень высокой энергии по сравнению с малой энергией излучаемого фотона. В результате применение атомарных газов связано с большими потерями энергии и низким квантовым к. п. д. С другой стороны, в молекулах вибрационные уровни основного электронного состояния очень близки к основному уровню молекулы. Поэтому энергия фотона составляет значительную часть полной энергии, необходимой для возбуждения молекулы из основного состояния на верхний лазерный уровень. Этим обусловлен высокий квантовый к. п. д. На схеме справа показано, что колебательные состояния в свою очередь включают систему вращательных уровней энергии. Число, стоящее у каждого уровня, указывает величину момента в единицах $\hbar/2\pi$. Указаны два разрешенных инфракрасных перехода между вращательными уровнями, принадлежащими двум различным колебательным состояниям.

зовать и переходы между двумя различными колебательными уровнями одного и того же электронного состояния молекул. Такие переходы действи-

тельно наблюдаются между двумя вращательными подуровнями двух разных колебательных состояний. Более того, в силу расходимости вращательных уровней данного колебательного состояния и квантовых правил отбора, в простейшем случае разрешающих только переходы с изменением вращательного момента на $\pm h/2\pi$, переходы между двумя колебательными состояниями приводят к появлению в спектре целой колебательно-вращательной полосы (рис. 3).

Центр полосы соответствует расстоянию между колебательными уровнями в отсутствие вращения, линии с длинноволновой стороны соответствуют переходам с изменением момента на $+h/2\pi$ и образуют так называемую *P*-ветвь, тогда как группа коротковолновых линий связана с изменением момента на $-h/2\pi$ и называется *R*-ветвью. Как видно из рисунка, *P*- и *R*-ветви имеют почти одинаковую протяженность. Эти колебательно-вращательные переходы, которые обычно соответствуют излучению в инфракрасной области, служат основой для всех процессов в сверхмощных лазерах на молекулярных газах.

Теперь я попытаюсь объяснить, как несколько лет назад в «Bell Laboratories» мне удалось построить непрерывно действующий колебательно-вращательный лазер на молекулярном газе. В процессе наших исследований лазерного излучения атомарных газов выяснилось, что для целей получения высокой выходной мощности в инфракрасной области (длины волн больше нескольких микрон) атомарные газы являются далеко

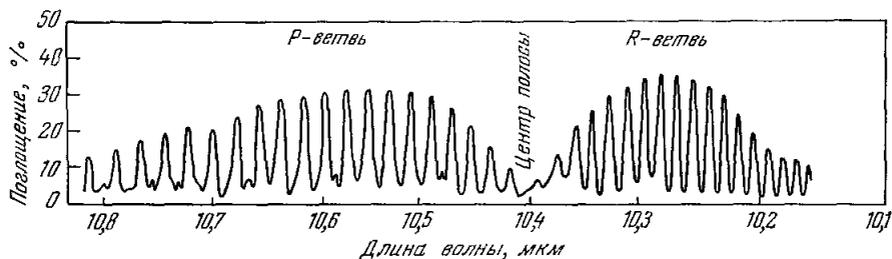


Рис. 3. Переходы между вращательными подуровнями энергии, принадлежащими двум различным колебательным уровням одного и того же электронного состояния молекулы двуокиси углерода, приводят к инфракрасному излучению ряда различных длин волн, образующих так называемую колебательно-вращательную полосу. На кривой показаны длины волн линий поглощения невозбужденного углекислого газа. Центр полосы соответствует интервалу между колебательными уровнями в отсутствие энергии вращения; переходы с длинноволновой стороны соответствуют изменению углового момента вращения на $+h/2\pi$ и образуют *P*-ветвь, тогда как коротковолновые переходы происходят с изменением момента на $-h/2\pi$ и образуют *R*-ветвь. Приведенная на рисунке полоса дает лазерное излучение 10,6 мкм.

не идеальными системами. В первую очередь — из-за того, что для большинства атомарных газов электронные уровни энергии, переходы между которыми лежат в инфракрасной области, расположены вблизи границы ионизации атома, далеко от основного состояния. В результате, чтобы получить эффект генерации, атом должен быть возбужден на очень высокий энергетический уровень, тогда как излучаемый фотон имеет сравнительно малую энергию, т. е. использование атомарных газов приводит к низкому квантовому и соответственно низкому рабочему к. п. д.

Такая система имеет и другой серьезный недостаток. Вблизи границы ионизации элемента энергетические уровни, соответствующие различным электронным конфигурациям, размещены в очень узкой энергетической области; в результате возбуждение электронным ударом, которое служит механизмом для получения лазерной генерации в газовом разряде,

оказывается существенно неизбирательным и плотность атомов на верхнем лазерном уровне достаточно мала. Это приводит к дополнительному ограничению выходной мощности и в результате к понижению рабочего к. п. д., так как из-за возбуждения атомов на различные уровни теряется значительная часть быстрых электронов, способных возбудить атомы на верхний лазерный уровень. Обычно лазер на атомарном газе, дающий излучение с длиной волны порядка 10 мкм, имеет мощность только в несколько киловатт и рабочий к. п. д. около 0,001%.

Ситуация существенно изменилась, когда обратились к молекулам. Колебательно-вращательные уровни, принадлежащие основному электронному состоянию молекулы, идеальны для эффективной и мощной лазерной системы инфракрасного диапазона.

Вибрационные уровни основного электронного состояния достаточно близки к основному уровню молекулы, и поэтому энергия лазерного фотона составляет значительную долю полной энергии, необходимой для возбуждения молекулы из основного состояния на верхний лазерный уровень. Это обеспечивает очень высокий квантовый к. п. д. по сравнению с таковым для инфракрасного лазера на атомарном газе. Кроме

того, так как колебательные уровни близки к основному состоянию молекулы, почти все электроны в разряде эффективно участвуют в процессе возбуждения. Этот факт обеспечивает как высокий рабочий к. п. д., так и большую выходную мощность, так как теперь достигается значительная заселенность молекул на верхнем уровне.

Основываясь на этом, я решил исследовать возможность генерации с использованием колебательно-вращательных переходов в основном электронном состоянии молекулы двуокиси углерода. Двухатомные молекулы представлялись менее подходящими для генерации из-за неблагоприятных времен жизни различных колебательных уровней основного электронного состояния.

Двуокись углерода была выбрана по двум причинам: она является одной из простейших трехатомных молекул, и, кроме того, уже имеется большое количество спектроскопических данных о ее колебательно-вращательных

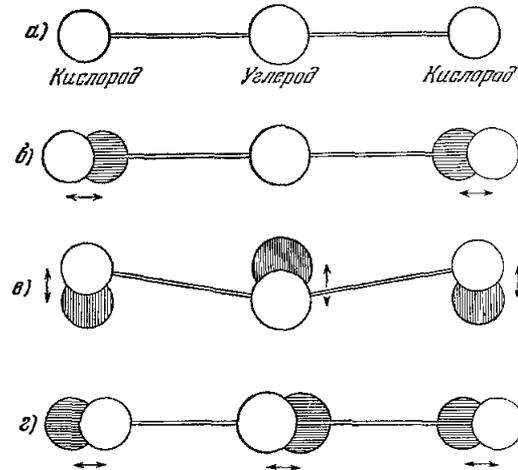


Рис. 4. Молекула двуокиси углерода (а) линейна, с симметричной конфигурацией и обладает тремя колебательными степенями свободы. В случае симметричного валентного колебания (б) атомы симметрично смещаются вдоль оси молекулы. В случае деформационного типа колебаний (в) смещения атомов перпендикулярны оси молекулы. В асимметричном валентном типе (г) атомы смещаются в направлении оси несимметрично. Соответственно колебательное состояние молекулы описывается тремя квантовыми числами ν_1 , ν_2 и ν_3 и обычно записываются в виде $(\nu_1\nu_2\nu_3)$, где ν_1 , ν_2 и ν_3 означают числа колебательных квантов колебаний типа ν_1 , ν_2 , ν_3 .

переходах. Молекула двуокиси углерода имеет симметричную линейную конфигурацию и характеризуется тремя степенями свободы (рис. 4). Одна степень связана с симметричными колебаниями атомов молекулы вдоль оси. Такой тип колебаний называется симметричным растяжением и обозначается ν_1 . Другой симметричный тип представляют колебания атомов перпендикулярно оси. Его называют деформационным

типом колебаний и обозначают ν_2 . Наконец, существует асимметричный тип колебания вдоль оси, обозначаемый ν_3 . Согласно правилам квантовой механики энергии колебаний квантуются и различны между собой.

В первом приближении эти три типа колебаний независимы друг от друга. В результате молекула двуокиси углерода может быть возбуждена в состояние, являющееся некоторой комбинацией трех отдельных типов колебаний, т. е. колебательное состояние молекулы должно описываться тремя квантовыми числами ν_1 , ν_2 и ν_3 , каждое из которых представляет число возбужденных квантов колебаний ν_1 , ν_2 и ν_3 . Соответственно обозначение данного колебательного уровня имеет вид $(\nu_1\nu_2\nu_3)$.

На диаграмме уровней энергии (рис. 2) нескольких низлежащих колебательных состояний двуокиси углерода для простоты исключена вращательная структура каждого колебательного уровня. Вращательные уровни расположены значительно гуще, чем колебательные. Вибрационные уровни с различными квантами типов колебаний ν_1 , ν_2 и ν_3 образуют почти равно разделенные ступеньки, хотя на рисунке показаны только самые нижние состояния (один или два кванта колебательной энергии). По ряду причин, таких, как время жизни молекулы в различных состояниях и вероятность возбуждения электронным ударом из основного состояния, как верхний лазерный удобен уровень (001), а уровни (100) и (020) образуют нижние лазерные уровни. Молекулы, достигающие нижних уровней, переходят в основное состояние излучая или в результате столкновения через уровень (010). Колебательно-вращательный переход (001)—(100) дает инфракрасное излучение около 10,6 мкм, а переход (001)—(020) — около 9,6 мкм. Соответственно квантовый к. п. д. лазера на переходе (001)—(100) составляет приблизительно 40%, а на (001)—(020) — около 45%. Все это — и высокий квантовый к. п. д., и возможность избирательного возбуждения на уровни, близкие к основному, — делало заманчивым исследование этой системы, для которой мы ожидали получить практический к. п. д. порядка 20—30%.

В первых наших экспериментах лазерная трубка наполнялась чистой двуокисью углерода под давлением около 1 тор (1 мм рт. ст.). Электрический разряд получался за счет постоянного высоковольтного напряжения. В таком разряде осуществляется большое число столкновений между быстрыми электронами и молекулами CO_2 . Часть электронов вызывает диссоциацию молекул на атомы углерода и кислорода. Однако пороговая энергия этого процесса достаточно велика, и число электронов, обладающих столь высокой энергией, очень мало. Менее быстрые электроны, которые преобладают в разряде, возбуждают молекулы CO_2 на различные вибрационные уровни. При этом оказалось, что электроны возбуждают молекулы преимущественно на уровни $(00\nu_3)$, которые образуют почти равностоящую последовательность квантов колебания ν_3 .

Следует напомнить, что верхний лазерный уровень для генерации излучения 10,6 мкм есть один из этой последовательности с ν_3 , равным 1. Означает ли это, что молекулы CO_2 , возбужденные в более высокие состояния $(00\nu_3)$ ($\nu_3 > 1$), не участвуют в лазерном излучении, понижая тем самым к. п. д. и выходную мощность системы? Практически этого не случилось, так как уровни $(00\nu_3)$ разделены почти равными интервалами, вследствие чего столкновение между молекулами $(00\nu_3)$ и (000) приводит к эффективному переносу колебательной энергии от возбужденных молекул к невозбужденным. Молекулы CO_2 $(00\nu_3)$ теряют один квант колебательной энергии и превращаются в молекулы $\text{CO}_2(00\nu_3-1)$, тогда как молекулы $\text{CO}_2(000)$ получают этот квант энергии и переходят в состояние $\text{CO}_2(001)$, т. е., другими словами, на верхний лазерный уровень (рис. 5, а).

Этот процесс носит резонансный характер в том смысле, что имеет место лишь перераспределение энергии возбуждения между молекулами без какой-либо потери ее за счет превращения в кинетическую (тепловую) энергию. Это означает, что эффективность превращения молекул $\text{CO}_2(00\nu_3)$ в молекулы $\text{CO}_2(001)$ без потери энергии очень высока.

Следовательно, за счет электронных ударов в газовом разряде практически возможно очень эффективное возбуждение молекул двуокиси углерода на нужный уровень.

Молекулы $\text{CO}_2(001)$ могут теперь, например, излучить фотон 10,6 мкм и перейти на уровень (100), с которого они должны вернуться в основное

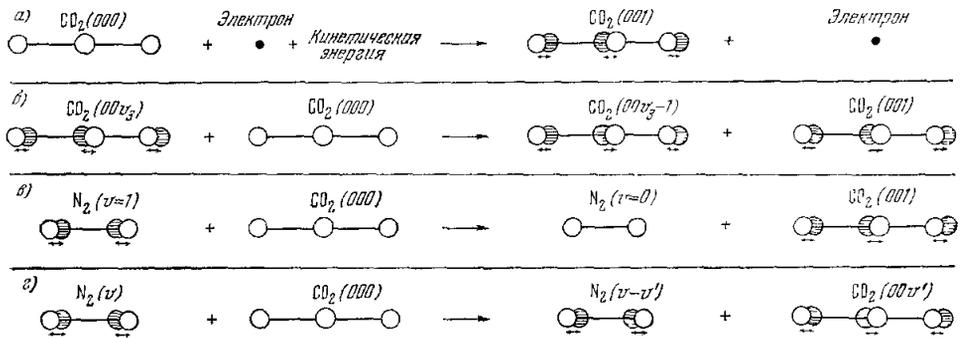


Рис. 5. Механизм возбуждения молекулы двуокиси углерода до верхнего лазерного уровня (в данном случае уровня (001)). Столкновение невозбужденной (000) молекулы CO_2 с энергичным электроном в электрическом разряде может непосредственно поднять молекулу на уровень (001) (а). Такое столкновение может возбудить (000)-молекулу на уровень $(00\nu_3)$, которому соответствует число квантов колебательной энергии больше одного; в этом случае последующие столкновения с невозбужденными молекулами вызывают перенос одного кванта колебательной энергии к невозбужденной молекуле с возбуждением их на уровень (001) (б). В лазере $\text{N}_2 - \text{CO}_2$ столкновения между вибрационно-возбужденными молекулами азота и невозбужденными молекулами двуокиси азота могут переводить молекулы CO_2 на уровень (001) за счет передачи одного кванта колебательной энергии от молекулы азота, которая первоначально имела лишь один (в) или более (г) квантов колебательной энергии.

состояние с тем, чтобы молекула снова смогла быть использована для получения лазерного фотона. С нижнего лазерного уровня молекулы уходят по существу за счет столкновений с другими молекулами. Здесь опять важную роль играет резонансный перенос колебательной энергии. Нижнему лазерному уровню соответствует энергия почти вдвое бóльшая,

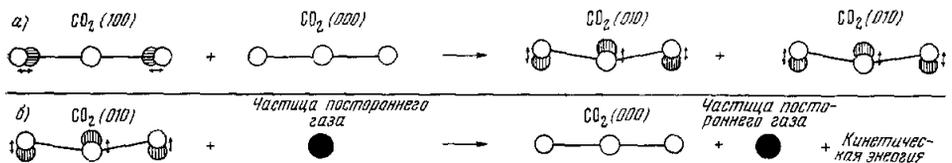


Рис. 6. Механизмы девозбуждения, способствующие «расселению» нижних колебательных уровней молекулы двуокиси углерода, могут привести к увеличению мощности лазера. Здесь изображены два вида таких девозбуждающих столкновений. В случае а) столкновение возбужденной (100) молекулы с невозбужденной (000) переводит обе молекулы на уровень (010). В случае б) молекула в состоянии (010) может в свою очередь столкнуться с частицей постороннего газа (или со стенкой лазерной трубки) и в результате возвратиться в основное состояние, откуда она снова может быть возбуждена.

чем требуется для возбуждения на колебательный уровень (010). В результате столкновение с участием молекул $\text{CO}_2(100)$ или $\text{CO}_2(020)$ и $\text{CO}_2(000)$ приводит к перераспределению колебательной энергии между двумя молекулами с возбуждением каждой из них на уровень $\text{CO}_2(010)$ (рис. 6, а).

Из-за резонансного характера этого процесса расселение нижнего лазерного уровня осуществляется очень быстро. Однако на этом процесс девозбуждения не заканчивается.

Молекулы CO_2 (010) должны еще вернуться в основное состояние, чтобы затем снова принять участие в лазерном излучении. Расселение уровня (010) также осуществляется за счет столкновения, но на этот раз они не резонансны, и энергия молекул CO_2 (010) превращается в кинетическую. Эти столкновения происходят с участием других молекул CO_2 , частиц постороннего газа или стенок лазерной трубки (рис. 6, б).

Из-за нерезонансного характера превращения колебательной энергии в кинетическую девозбуждение молекул CO_2 (010) может протекать медленно, что является самым узким местом во всем цикле, так как понижает к. п. д. и выходную мощность системы. С самого начала я выяснил, что даже в лазере на чистой двуокиси углерода процесс девозбуждения протекает достаточно быстро для осуществления мощной генерации при колебательно-вращательных переходах (001) — (100) и (001) — (020), дающих излучение соответственно 10,6 и 9,6 мкм. Обнаружилось, что благодаря большей вероятности перехода излучение 10,6 мкм интенсивнее, чем 9,6 мкм, приблизительно в 10 раз. Для простоты в дальнейшем мы будем рассматривать только переходы 10,6 мкм.

Совершенно ясно, что возбуждение электронным ударом, осуществляемое в разряде в чистой двуокиси углерода, не может обеспечить высокоизбирательное возбуждение молекул на верхний лазерный уровень, что необходимо для получения практического к. п. д., близкого к квантовому. Причиной этому является то, что электроны могут возбуждать молекулы CO_2 на уровни, отличные от ($00\nu_2$), понижая при этом как к. п. д., так и выходную мощность. Для повышения к. п. д. существует несколько форм избирательного возбуждения молекул CO_2 на верхний лазерный уровень. Такое селективное возбуждение осуществляется, если к двуокиси углерода добавить азот.

Роль азота можно объяснить, обратившись к диаграмме уровней энергии (рис. 7) низлежащих колебательных подуровней основного электронного состояния молекулярного азота. Азот — двухатомная молекула и имеет только одну колебательную степень свободы, ее колебательная энергия определяется квантами энергии, обусловленными только колебаниями вдоль оси молекулы. Соответственно колебательные уровни энергии азота полностью описываются одним колебательным квантовым числом ν . Так как молекула азота состоит из двух одинаковых атомов, то молекулярный азот, возбужденный на различные колебательные уровни основного электронного состояния, не может отдавать энергию излучательно или за счет столкновений, и поэтому эти состояния крайне долгоживущи.

Молекулы азота эффективно возбуждаются электронным ударом с уровня $\nu = 0$ на различные колебательные уровни; они могут попадать туда также в результате ступенчатого перехода из возбужденных электронных состояний или рекомбинации атомов азота. В разряде в парах азота при низком давлении на уровень $\nu = 1$ может возбудиться около 30% молекул. Так как энергия возбуждения молекулы N_2 почти равна энергии возбуждения молекулы CO_2 (001), можно ожидать эффективного переноса колебательной энергии от азота к двуокиси углерода при столкновении этих молекул. В результате такого столкновения молекула азота возвращается с уровня $\nu = 1$ в основное состояние, теряя квант колебательной энергии, а молекула CO_2 возбуждается из основного состояния на уровень (001). Из-за резонансного характера этого процесса очень эффективно осуществляется избирательное возбуждение молекул на верхний лазерный уровень (рис. 5, б).

Более того, вышележащие колебательные уровни молекулы азота, как и уровни CO_2 , ($00\nu_3$), почти равноотстоят друг от друга. Следовательно, при столкновениях с участием молекул N_2 (ν) и CO_2 (000) может иметь место эффективный перенос колебательной энергии, в результате которого молекула N_2 (ν) теряет ν' квантов колебательной энергии и опускается на уровень N_2 ($\nu - \nu'$), тогда как молекула CO_2 (000) приобретает ν' квантов и селективно возбуждается до уровня CO_2 ($00\nu_3 = \nu'$). Так как интервалы внутри последовательностей уровней N_2 (ν) и CO_2 ($00\nu_3$) почти равны, эти столкновения обуславливают высокую эффективность резонансного переноса колебательной энергии. Затем молекулы

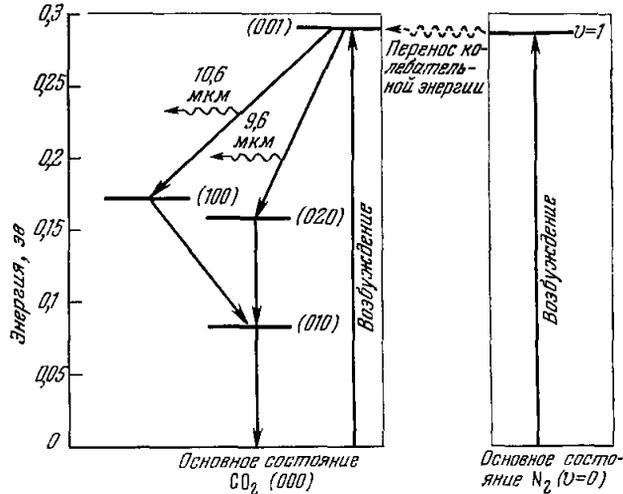


Рис. 7. Добавление азота в лазер на CO_2 приводит к избирательному возбуждению молекул двуокиси углерода на верхний лазерный уровень. Двухатомная молекула азота имеет только одну колебательную степень свободы, поэтому единственное квантовое число ν полностью описывает его колебательные уровни энергии. Молекулы азота эффективно возбуждаются электронным ударом в разряде низкого давления с уровня $\nu = 0$ на $\nu = 1$. Так как энергия возбуждения молекулы N_2 ($\nu = 1$) почти равна энергии возбуждения молекулы CO_2 (001), при столкновениях между молекулами N_2 ($\nu = 1$) и CO_2 (000) имеет место эффективный перенос энергии от азота к двуокиси углерода. В результате молекула азота возвращается с уровня $\nu = 1$ в свое основное состояние с потерей одного кванта колебательной энергии, возбуждая при этом молекулу CO_2 из основного состояния до уровня (001). Затем молекула CO_2 может перейти либо на уровень (100), либо на (020), излучив соответственно инфракрасный свет 10,6 или 9,6 мкм.

CO_2 ($00\nu_3 = \nu'$) за счет резонансных столкновений, обсужденных выше, переходят на уровень CO_2 (001), т. е. на верхний лазерный уровень (рис. 5, 2). В конце концов осуществляется эффективное избирательное возбуждение молекул CO_2 на верхний лазерный уровень, и можно ожидать значительного увеличения к. п. д. и выходной мощности лазера на $\text{CO}_2 - \text{N}_2$ по сравнению с лазером на чистом CO_2 .

Первая экспериментальная установка, на которой проверялись эти гипотезы, показана на рис. 8. В системе с непрерывным потоком газа электрический разряд осуществлялся не в той области взаимодействия, где ожидалось проявление эффекта генерации. Поступающий в установку азот проходил через область возбуждения, где приложено переменное или высоковольтное постоянное напряжение. По мере прохождения через область разряда молекулы азота возбуждаются до различных колебательных подуровней основного состояния.

Благодаря непрерывности потока газа молекулы азота, попавшие в область разряда, отсасываются в область взаимодействия за время, короткое по сравнению со средним временем жизни колебательно-возбужденных молекул азота. Поэтому газ азота, поступающий в область взаимодействия, содержит значительную часть все еще возбужденных, находящихся на колебательных подуровнях основного электронного состояния молекул. Двуокись углерода, поступающая через другое отверстие, смешивается с азотом. В результате столкновений колебательно-возбужденных молекул азота и невозбужденных молекул CO_2 колебательная энергия передается последним. Таким образом, молекулы CO_2 избирательно

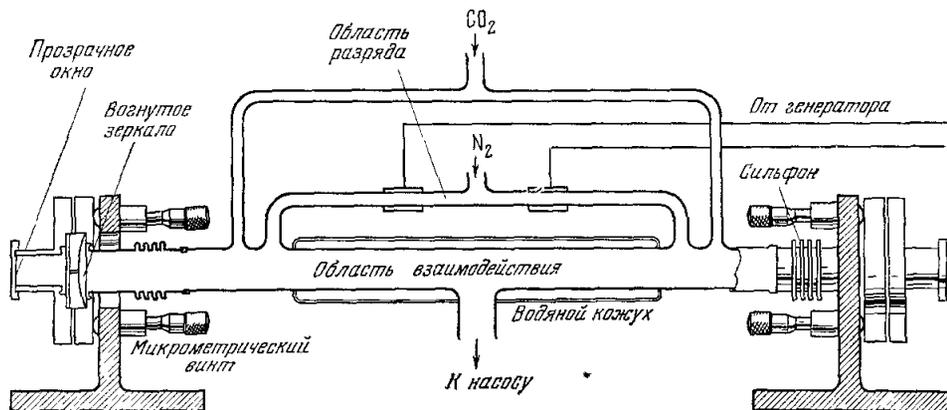


Рис. 8. Для проверки гипотезы о том, что более эффективен лазер на двуокиси углерода с азотом, автором использовалась система с непрерывным потоком газа. В такой системе получено интенсивное лазерное излучение на колебательно-вращательных переходах двуокиси углерода, даже несмотря на то, что в области взаимодействия не было электрического разряда. Тем самым подтвердилась эффективность использования вибрационно-возбужденных молекул азота для избирательного возбуждения молекул двуокиси углерода на верхний лазерный уровень.

возбуждаются на верхний лазерный уровень. Отметим, что других способов возбуждения молекул CO_2 в этой области устройства не существует. Несмотря на то, что в области взаимодействия нет разряда, колебательно-вращательные переходы в молекулах могут обеспечить мощную генерацию.

По мере того как молекулы CO_2 вносят свой вклад в излучение, девозбужденные молекулы непрерывно откачиваются, а для продолжения действия лазера поступают новые порции азота и CO_2 . Высокая интенсивность лазерного излучения подтверждает эффективность использования колебательно-возбужденных молекул азота для избирательного возбуждения молекул CO_2 на верхний лазерный уровень. Разряд в парах азота и последующее смешивание азота и двуокиси углерода в лазерной трубке приводят к высокой эффективности превращения энергии ($\sim 5\%$).

Ускорение расселения нижних лазерных уровней устранением «узкого места» на уровне (010) молекулы CO_2 тоже может привести к повышению как выходной мощности, так и к. п. д. лазера на двуокиси углерода. Ранее я отмечал, что девозбуждение молекул CO_2 (010) осуществляется за счет превращения энергии молекулы CO_2 (010) в кинетическую энергию в результате столкновений с другими частицами. Скорость протекания этого процесса зависит от природы других частиц. Например, при давлении 1 тор сами молекулы CO_2 испытывают около 100 таких столкновений за 1 сек, тогда как атомы гелия дают 4000 (а молекулы

воды 100 000) девозбуждающих переходов за 1 *сек* при том же давлении, т. е. у нас имеется еще один способ повышения выходной мощности и к. п. д. азот-углекислой лазерной системы.

Было обнаружено, что для получения высоких непрерывной выходной мощности и к. п. д., в разрядной трубке необходимо присутствие дополнительного газа. Такие газы, как кислород, пары воды, водород и гелий, увеличивают выходную мощность. Это обусловлено двумя эффектами: 1) рост скорости расселения нижнего колебательного уровня молекулы CO_2 и 2) увеличение скорости возбуждения молекул CO_2 на уровень (001) либо прямо в результате электронного удара, либо косвенно за счет роста скорости возбуждения молекул азота. Возможны оба пути ускорения возбуждения молекул CO_2 на верхний лазерный уровень: за счет увеличения плотности электронов в разряде, а также за счет изменения распределения энергии электронов, приводящего к более эффективному прямому возбуждению молекул CO_2 на уровень (001) и более быстрому образованию молекул N_2 (*v*).

Наиболее подходящим с этих двух точек зрения оказывается гелий, и именно он наиболее широко используется как третий газ. Пары воды и водород полезны только с точки зрения первого эффекта. Окись углерода существенна с точки зрения как возбуждения, так и девозбуждения.

При давлении двуокиси углерода 3 *тор*, азота — 3 *тор* и гелия около 20 *тор* удается получить непрерывную мощность 80 *вт* на метр длины разряда на длине волны 10,6 *мкм*. Рабочий к. п. д. в этом случае достигает 20%.

В настоящее время в большинстве мощных лазеров на CO_2 через лазерную трубку медленно протекает газ. Однако еще некоторые наши ранние эксперименты в «Bell Laboratories» и недавние в «Philips Research Laboratory» в Нидерландах показали, что если достаточно тщательно изготовить трубку и использовать подходящую смесь газов, можно сконструировать герметический лазер. Такие генераторы могут давать выходную мощность и к. п. д. столь же большие, как и в системах потока газа.

Типичный лазер на CO_2 имеет длину около 2 *м* и может давать в непрерывном режиме мощность около 150 *вт*. Ничто не мешает изготовлению длинных лазеров для получения много более высокой выходной мощности, которая растет линейно с длиной трубки.

В «Raytheon Company» сконструирован изогнутый лазер на CO_2 , имеющий 600 футов длины. Этот лазер дает мощность 8,8 *квт* в непрерывном режиме, т. е. выходная мощность такого лазера догоняет мечты научной фантастики, а тепловой эффект при этом определенно внушает некоторый ужас.

Экспериментальное устройство, показанное на рис. 8, полезно при изучении эффекта генерации в неустойчивых молекулярных газах, т. е. таких, которые легко диссоциируют при прямом возбуждении в разряде или требуют высокоизбирательного возбуждения для непрерывного действия лазера (например, двухатомные газы). В этом устройстве в лазерной области разряда не происходит, и поэтому могут быть возбуждены только те уровни активного газа, энергия которых совпадает с энергией колебательно-возбужденных молекул азота. Таким способом была получена непрерывная генерация на колебательно-вращательных переходах окиси углерода (CO) с длиной волны 5—6 *мкм*, на окиси азота (N_2O) на переходе (001)—(100) — 10,8 *мкм* и дисульфиде углерода (CS_2) на переходах (021)—(120) — около 11 *мкм*.

Лазер на окиси углерода очень интересен с точки зрения спектроскопии. В данном случае мы в состоянии наблюдать переходы между колебательными уровнями основного состояния с высоким квантовым

числом, $\nu = 25$, т. е. переходы, которые до этого никогда не наблюдались. Окись азота, по типам колебания подобная окиси углерода, может генерировать высокую непрерывную выходную мощность при к. п. д., сравнимым с к. п. д. системы на двуокиси углерода; однако окись азота детально еще не исследована. В любом случае получения высокой выходной мощности и высокого к. п. д. в общих чертах применима техника избирательного возбуждения.

Возможны и другие способы получения колебательных возбуждений в молекулах — за счет химических реакций, нагревания газов в пламени или горелках и оптического возбуждения подходящим излучением разряда или пламени. Эти методы пока еще широко не применяются, но достаточно многообещающи. Однако тот факт, что возбуждение лазера на CO_2 разрядом обеспечивает эффективность превращения энергии более чем 20%, содержит серьезный вызов новым методам с точки зрения их практической значимости.

До сих пор я рассматривал лишь механизмы возбуждения и девозбуждения, которыми обусловлены очень высокая мощность лазеров на двуокиси углерода, и ничего не сказал о спектре излучения. Я уже отмечал, что так как вращательные подуровни верхнего и нижнего лазерных колебательных уровней расположены очень тесно, переходы между двумя колебательными состояниями проявляются в виде полос, состоящих из P - и R -ветвей. Означает ли это, что для такого лазера наблюдается одновременное излучение ряда частот, соответствующих различным переходам P - и R -ветвей? Если бы осуществлялось излучение сразу нескольких частот, лазерный луч не был бы монохроматичным и это ограничивало бы его использование в такой области, как связь. В действительности излучение сверхмощного лазера на CO_2 обычно сосредоточено без каких-либо помех только в одном переходе P -ветви, как правило, $P(20) - 10,5915$ мкм, несмотря на то, что колебательная полоса (001) — (100) содержит целый ряд возможных переходов в P - и R -ветвях. Это объясняется действием некоторого довольно тонкого «эффекта конкуренции» между переходами P -ветви и R -ветви, который колоссально повышает ценность лазера на двуокиси углерода. Существенно, что расстояние между различными колебательными уровнями, как правило, много больше кинетической энергии молекул (0,25 эв при комнатной температуре). Расстояние между вращательными уровнями энергии, наоборот, меньше кинетической энергии. Таким образом, плотность частиц на некотором вращательном подуровне данного колебательного состояния не может не зависеть от заселенности других вращательных уровней, так как любое столкновение может вызвать обмен порцией энергии, равной интервалу между уровнями. В результате молекула может очень быстро перескакивать с одного вращательного уровня на другой. Частота таких скачков (скорость вращательной релаксации) достигает 10 миллионов переходов за 1 сек при рабочем давлении газа в лазере. Однако в силу больших расстояний между колебательными уровнями скорость колебательной релаксации очень низка — около 1000 в 1 сек. Время жизни колебательного состояния с учетом излучательной и тепловой релаксации составляет миллисекунды, тогда как вращательного — значительно меньше, всего около 10^{-7} сек. Это означает, что за время пребывания на колебательном уровне молекула испытывает очень большое число столкновений. Это приводит к больцмановскому распределению молекул по вращательным уровням данного колебательного состояния (рис. 9).

Учет рассмотренных выше условий, определяющих плотность заселенности вращательных уровней, позволяет рассчитать изменение интен-

сивности различных переходов в P - и R -ветвях. Из рассчитанного таким образом набора кривых (рис. 10) легко получить полезные выводы: 1) Некоторые переходы P -ветви усиливаются, даже если полная плотность заселенности нижнего лазерного уровня превосходит заселенность верхнего, так как при этом переходы R -ветви не усиливаются, такая ситуация называется «частичной инверсией». 2) Когда полная плотность частиц в верхнем лазерном колебательном

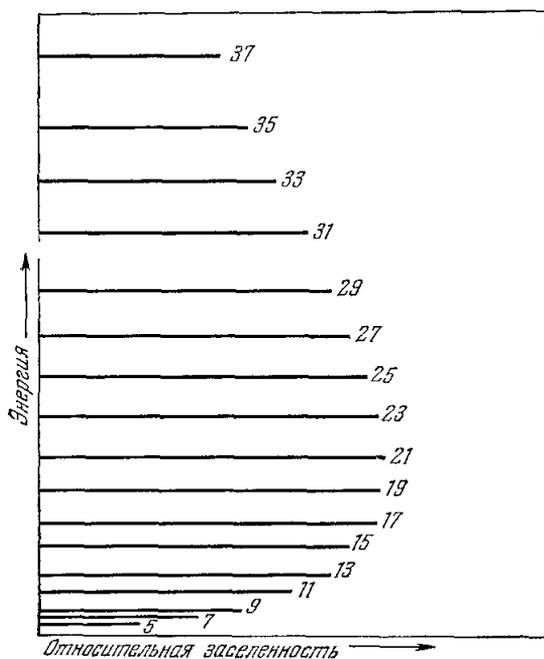


Рис. 9. Больцмановское распределение плотности молекул по вращательным уровням энергии колебательного состояния (001) обусловлено тем, что в течение времени жизни в данном состоянии молекулы испытывают большое число столкновений, в результате чего число переходов между вращательными уровнями достигает 10 миллионов в 1 сек. По горизонтальной шкале отложены плотности частиц на вращательных уровнях при 400°K . По вертикали указаны положения вращательных уровней.

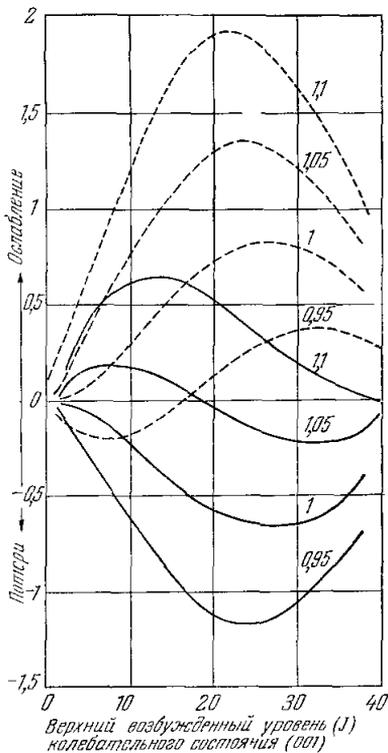


Рис. 10. Эффект конкуренции между различными возможными колебательно-вращательными лазерными переходами в CO_2 обычно приводит к преобладанию одного из переходов P -ветви. Этот набор кривых характеризует величину усиления (или потерь) ряда переходов P -ветви (пунктирные) и R -ветви (сплошные) данной колебательной полосы. Число у каждой кривой есть отношение полной плотности частиц на верхнем (001) колебательном лазерном уровне к полной плотности частиц на нижнем (100) лазерном уровне.

состоянии больше, чем в нижнем, усиливаются переходы и P - и R -ветвей. Это называют «полной инверсией». 3) Даже для случая полной инверсии переход R -ветви всегда усиливается меньше, чем переход P -ветви, начинающийся с того же самого верхнего вращательного уровня.

Рассмотрим, каково практическое значение этих эффектов. Ясно, что одновременно усиливается целый ряд переходов, тогда как быстрая вращательная релаксация требует, чтобы для поддержания больцмановского распределения изменение заселенности одного вращательного уровня

влекло за собой изменения заселенности всех вращательных уровней. В первую очередь начинается генерация при переходе с наибольшим усилением — в этом случае $P(22)$. Этот переход P -ветви будет самым сильным, так как переходы R -ветви усиливаются слабее. В результате возрастает скорость ухода молекул с вращательного уровня $j = 21$ из-за вынужденного излучения на переходе $P(22)$. Но требование Больцмановского распределения вызывает переходы молекул с других вращательных уровней на $j = 21$, и, несмотря на то, что в результате генерации опустошается уровень $j = 21$, параллельно уменьшается плотность заселенности всех уровней. Это приводит к очень сильной конкуренции между возможными лазерными переходами, и обычно доминирует переход P -ветви.

В результате этого эффекта конкуренции излучение сверхмощного лазера на двуокиси углерода сосредоточено только в одном вращательном переходе полосы (001)—(100), обеспечивая тем самым высокую степень когерентности и монохроматичности.

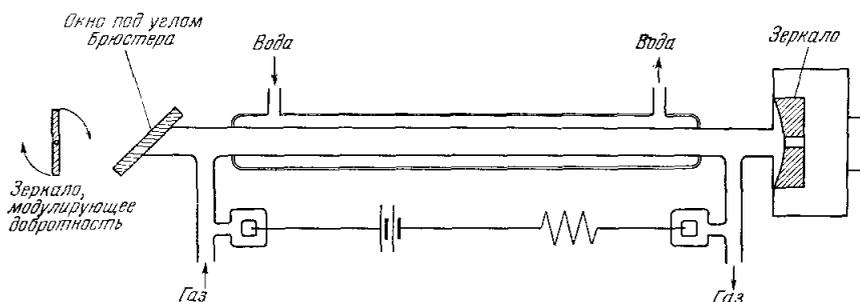


Рис. 11. Модуляция добротности — способ использования лазера непрерывного действия в импульсном режиме — осуществляется заменой одного из зеркал лазерного оптического резонатора вращающимся зеркалом. Лазер действует каждый раз, когда вращающееся зеркало (слева) оказывается параллельным противоположному стационарному зеркалу (справа). Лазер на CO_2 , дающий в непрерывном режиме мощность приблизительно 50 *вт*, при модуляции добротности будет излучать почти 50 *квт* в импульсах длительностью около 150 *нсек* при частоте следования около 400 вспышек в 1 *сек*.

При условии, что имеется достаточное усиление, а в лазерный резонатор для предотвращения генерации на более сильном переходе введен какой-нибудь элемент, выделяющий нужную длину волны, типа дифракционной решетки или призмы, возможна также генерация и на более слабых переходах P - и R -ветвей. Из-за сильной конкуренции можно получить приблизительно одинаковую выходную мощность на всех переходах.

Кроме того, благодаря большому времени жизни колебательных уровней, ответственных за генерацию, можно накопить энергию в области разряда, перекрывая на время порядка миллисекунд путь лазерного луча в резонаторе и тем самым предотвращая генерацию. Если затем резко открыть путь луча, наблюдается излучение в виде резкого импульса с пиковой мощностью, обычно в 1000 раз превышающей среднюю мощность этого же лазера в непрерывном режиме. Такую операцию называют модуляцией добротности.

Изменение добротности легко осуществляется заменой одного из зеркал оптического резонатора вращающимся зеркалом (рис. 11).

Лазер срабатывает каждый раз, когда вращающееся зеркало оказывается параллельным стационарному. При такой схеме управления

добротностью лазер на CO_2 , дающий в непрерывном режиме приблизительно 500 *вт*, будет давать почти 50 *квт* пиковой мощности в импульсе длительностью около 150 *нсек* при частоте следования около 400 вспышек в 1 *сек*. Столь мощные импульсы в сочетании с когерентностью излучения, свойственной газовым лазерам, очень полезны в физических исследованиях.

Примером идеального источника когерентного излучения может служить источник с непрерывной «настройкой», т. е. такой, у которого частоту излучения можно менять и контролировать непрерывным образом. Строго настройка высокомоощного молекулярного лазера невозможна, но число дискретных колебательно-вращательных переходов, которые могут участвовать в генерации, крайне велико. Например, у одной только окиси углерода имеется около 200 переходов, дающих излучение в интервале от 5 до 6 *мкм*, у двуокиси углерода между 9 и 11 *мкм* имеется около 100 переходов, на которых возможна мощная генерация. Короче говоря, хотя высокомоощные молекулярные лазеры и нельзя настраивать на любую частоту, они имеют широкую область дискретных рабочих частот.

Мощные лазеры на CO_2 , действующие как непрерывно, так и в режиме модуляции добротности, имеют широкие возможности для их применения. Фокусировка когерентного инфракрасного излучения на участок поверхности приблизительно в одну тысячную квадратного сантиметра, может дать интенсивность в миллион ватт на 1 *см*² в случае непрерывно действующего лазера и *Гвт* на 1 *см*² при модуляции добротности. Очевидно, что непрерывные мощности свыше 1 *квт* могут использоваться для резания и сварки металла. Сообщалось также о необычной «мягкости» гранита при облучении его лазером на CO_2 с киловаттной мощностью.

Хотя излучение CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 *мкм* не видно глазом, оно столь же разрушительно, как и излучение любого другого мощного лазера. Термические применения лазеров на CO_2 диктуются интересами промышленности.

Однако более существенны нетермические применения лазера. Это прежде всего возможное использование лазеров в системах оптической связи как на земле, так и в космическом пространстве. Наиболее привлекательным в этом плане является оптическое «окно» прозрачности земной атмосферы между 8 и 14 *мкм*. Высокий к. п. д. и высокая мощность излучения CO_2 -лазеров на длине волны 10,6 *мкм*, делают их идеальными кандидатами для использования в этих целях. Кроме того, CO_2 -лазеры идеальны для использования их в системах оптической локации, опять из-за низких потерь при прохождении их излучения через атмосферу. Другую возможность представляет применение CO_2 -лазера для исследования взаимодействия оптического излучения $\lambda = 10,6$ *мкм* с веществом, так как многие полупроводники, непрозрачные в видимой области, прозрачны для этой длины волны.

Еще одно применение сверхмощного лазера на двуокиси углерода связано с использованием излучения 10,6 *мкм* как «накачки» при исследовании нелинейных оптических свойств новых материалов в целях получения действительно настраиваемого источника инфракрасного излучения. В этой связи мы с коллегами выполнили ряд интересных экспериментов по генерации второй оптической гармоники, параметрическому усилению далекого инфракрасного излучения, двухфотонному рождению электронно-дырочной пары в полупроводниках, по наблюдению нелинейности, обусловленной электронами проводимости и комбинационным рассеянием на электронах уровней Ландау в полупроводниках. Некоторые из этих механизмов достаточно сильны, чтобы дать нам возможность,

построить настраиваемый лазер, излучающий в инфракрасной части спектра. Такой настраиваемый лазер, накачиваемый CO_2 -лазером с фиксированной частотой, может быть использован в качестве гетеродина в системе связи или локации. Более того, такой настраиваемый инфракрасный источник мог бы полностью изменить инфракрасную спектроскопию. Возможно, описание этих экспериментов послужит темой еще одной статьи. В заключение достаточно сказать, что лазеры на двуокиси углерода уже открыли простор физическим исследованиям, неизвестным ранее, и обещают неизмеримо больше плодотворных экспериментов в будущем.

Лаборатории «Белл Телефон»,
США

ЛИТЕРАТУРА

1. Arthur L. Schawlow, *Sci. American* **209** (1), 34 (1963) (см. перевод: УФН **81** (4), 745 (1963)).
 2. С. К. N. Patel, *Phys. Rev. Lett.* **12** (21), 588 (1964).
 3. С. К. N. Patel, *J. de Chim. phys. et de phys.-chim. biol.* **64** (1), 82 (1967).
-