

Реомар Ровинский

УДИВИТЕЛЬНОЕ СОЧЕТАНИЕ СВОЙСТВ МОЛЕКУЛ CO₂ И N₂, ПОЗВОЛИВШЕЕ СОЗДАТЬ CO₂ – ЛАЗЕР.

В 1964 году Пател создал первый маломощный молекулярный лазер, используя удивительное сочетание свойств двух молекул: CO₂ и N₂. Для накачки активной среды он применил тлеющий разряд. В последующие годы благодаря упорной работе нескольких групп исследователей, в том числе и в России, удалось повысить энергетику таких лазеров на несколько порядков, что потребовало непростых научно-технических решений. В настоящее время мощные CO₂ лазеры широко применяются для проведения обработки металлов, диэлектриков и полупроводников в тех случаях, когда решение технологических задач не удается осуществить традиционными методами.

Немного физики и истории

Ушедший XX век воспринимается нами не только как век величайших научных открытий, но и как век возникновения новых инженерно-технических областей человеческой деятельности. Одной из таких областей стало создание и широкое использование квантовых приборов, способных генерировать остронаправленное когерентное почти монохроматическое электромагнитное излучение оптического диапазона длин волн. Полное наименование таких приборов звучало так: **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, что переводится как Усиление Света за счет Вынужденного Излучения. Для повседневного пользования название слишком длинное. Поэтому возник его короткий вариант в форме аббревиатуры: **LASER**. В полном названии присутствуют два ключевые понятия, определяющие физическую основу таких приборов: 1) усиление света и 2) вынужденное излучение.

Создание лазеров прямо связано с проблемой усиления света при его прохождении через специально подготовленную оптическую среду, иначе говоря, с процессом взаимодействия света с веществом. Научное изучение таких процессов протекает на протяжении более 300 лет. Но до начала XX века наука знала лишь процессы поглощения и рассеяния света, а процесс усиления света при его взаимодействии с веществом не был известен. Одним из следствий открытия в начале XX века микромира стало понимание природы процессов испускания и поглощения света вещественными частицами – атомами, молекулами и ионами. Для примера ограничимся представлениями об испускании и поглощении света атомами.

Атом обладает определенной потенциальной энергией. Он стремится пребывать в состоянии, в котором эта энергия минимальна. Такое состояние называют основным состоянием атома. В среде, содержащей большое количество атомов, протекают процессы их соударений. Большинство таких соударений происходит упруго, потенциальная энергия каждой частицы остается прежней. Реже столкновение протекает неупруго, тогда часть кинетической энергии одного из столкнувшихся атомов передается партнеру, потенциальная энергия которого после этого возрастает. Состояние такого атома называют возбужденным. Однако, в отличие от макромира, в микромире передача атому энергии извне осуществляется только строго определенными дискретными порциями. Атом данного элемента обладает системой дискретных энергетических уровней, присущей только этому элементу. Соответственно, передача ему энергии извне происходит такими дискретными порциями, которые обеспечивают рост потенциальной энергии до одного из вышележащих энергетических уровней. В среде, находящейся в равновесном состоянии при температуре T многочисленные неупругие столкновения приводят к определенному распределению возбужденных атомов по энергетическим уровням, получившего название распределения Больцмана:

$$n_i \sim n \exp(-E_i/kT) \quad (1)$$

Здесь n_i – концентрация возбужденных атомов на i -том квантовом уровне с энергией E_i , n – общая концентрация атомов, k – постоянная Больцмана. Из этого соотношения видно, что чем выше энергия дискретного квантового уровня, тем меньше на нем концентрация возбужденных атомов, и падение их числа происходит по экспоненциальному закону.

Проходящий через оптическую среду световой луч можно рассматривать как поток фотонов, двигающихся в определенном направлении. На своем пути фотоны сталкиваются с

атомами. Такие столкновения следует рассматривать как столкновения двух частиц, происходящие либо упруго, либо неупруго. В случае упругого столкновения происходит рассеяние фотона, направление его движения может измениться. С неупругими столкновениями дело обстоит сложнее. Фотон при неупругом столкновении может передать свою энергию атому только целиком, при этом он исчезает. Если через среду проходит монохроматичный луч света, то поглощение фотонов атомами произойдет лишь при условии, что энергия фотона $E_{\phi} = h\nu$ (h - постоянная Планка, ν - частота электромагнитной волны) точно равна той порции энергии, которая соответствует энергетическому переходу атома в данное возбужденное состояние, на присущий ему квантовый уровень. В противном случае поглощение не состоится, дело ограничится только рассеянием фотонов на атомах среды. Неупругие столкновения фотонов с атомами определяют протекание процесса поглощения света веществом.

Атом пребывает в возбужденном состоянии ограниченное время. Его возвращение в основное состояние может происходить в одном из трех процессов: 1) при столкновении с другим атомом, сопровождаемым передачей ему энергии возбуждения в форме кинетической энергии движения (безизлучательный переход); 2) путем **спонтанного излучения**, происходящего случайным образом, когда время между возбуждением атома и испусканием фотона определяется лишь вероятностно; 3) путем **вынужденного излучения**, когда пролетающий около возбужденного атома фотон, энергия которого точно равна энергии перехода атома на определённый нижележащий квантовый уровень, вызывает испускание когерентного фотона той же частоты, поляризации и в том же направлении движения, что у фотона, инициировавшего этот акт. Тем самым снимается возбужденное состояние атома. В этом акте число одинаковых (когерентных) фотонов удваивается, третий случай есть не что иное, как **усиление света**.

Существование вынужденного излучения, делающего принципиально возможным усиление света средой, теоретически постулировал А. Эйнштейн в 1916 году. Вскоре постулат был подтвержден экспериментально. Понимание принципиальной возможности усиления света вошло в сознание передовых ученых-оптиков. Проблема усиления света перешла из теоретической проблемы в оптико-инженерную проблему того, как создать оптическую среду, в которой господствует вынужденное излучение. Именно такая среда будет усиливать проходящий через неё световой луч определённой длины волны. В земных условиях необходимая организация не может возникнуть сама собой. Эффект усиления света, при котором интенсивность светового луча на выходе оптической среды превышает его интенсивность на входе, никогда не наблюдался.

Для того чтобы в среде господствовало вынужденное излучение, необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, в среде должно присутствовать большое количество возбужденных атомов (ионов, молекул). Во-вторых, необходимо, чтобы на определённом удалении от ядра существовал так называемый метастабильный энергетический уровень с относительно большим временем жизни. Такое случается не у всякого вещества, образующего оптическую среду. В-третьих, необходимо придумать способ, чтобы основная часть возбуждаемых частиц оказалась сосредоточенной на таком метастабильном уровне. В-четвертых, чтобы существовал, по крайней мере, один нижележащий энергетический уровень с очень коротким временем жизни, который быстро освобождается от поступающих на него частиц, заселяющих верхний метастабильный уровень. При выполнении таких условий заселённость в среде верхнего энергетического уровня будет всегда превосходить заселённость нижнего уровня, между ними возникает то, что получило название **инверсной населенности**. Требование инверсной населенности уровней противоречит распределению Больцмана (1), которое справедливо для равновесного состояния среды. В равновесной среде акты спонтанного излучения преобладают над актами вынужденного излучения. Следовательно, необходимо, чтобы усиливающая среда была приведена в состояние сильной неравновесности, делающей возможным образование инверсной населенности.

В тридцатые годы XX века проблемой усиления света серьезно занялся известный физик, профессор В.А. Фабрикант. К концу 40-х годов вместе со своей аспиранткой Ф.А. Бутаевой он создал газоразрядную установку, в которой впервые осуществились условия для усиления проходящего через среду монохроматического светового луча. До создания лазера оставалось совсем немного – создать положительную обратную связь, обеспечивающую самовозбуждение среды и генерацию когерентного оптического излучения. Практиче-

ски сделать такой шаг в оптической области электромагнитных волн удалось в 1960 году Теодору Мэйману, поместившему в оптический резонатор (между двумя плоскопараллельными зеркалами) стержень из синтетического рубина, ставшего активной средой первого лазера. Накачка рубина производилась мощными вспышками света от импульсных газоразрядных ламп.

С этого момента началось бурное развитие подобных квантовых приборов и, что особенно важно, немедленное их использование в самых различных научных, технических и медицинских приложениях. Особый интерес проявлялся к проблеме создания мощных лазеров, способных осуществлять так называемую силовую обработку материалов – резание, сварку, термическую поверхностную обработку и многое другое. В реализации такого технологического направления важная роль принадлежит CO_2 лазерам. Первый образец такого лазера был создан Кумаром Н. Пателом в 1964 году. Его мощность была незначительной и сразу не была понятна перспектива ее повышения. О том, что собой представляет этот лазер и как удалось обеспечить необходимое увеличение его первоначальной мощности (энергии), рассказывается в следующих частях статьи.

Молекула CO_2 – рабочее вещество CO_2 лазера

Молекула CO_2 – трехатомная линейная молекула. Три входящих в ее состав атома – кислород-углерод-кислород – выстроены в одну линию. Если у атомов процесс возбуждения связан с переходом внешнего электрона на один из верхних квантовых уровней, то у молекулы к этому присоединяются так называемые колебательные и вращательные возбужденные состояния. Для возбуждения таких состояний требуется значительно более низкая энергия, чем для возбуждения электронного состояния, вызываемого переходом электрона на ближайший верхний квантовый уровень. Это обстоятельство может быть использовано для создания молекулярных лазеров.

Проблема получения лазерного излучения в активной молекулярной среде путем возбуждения колебательного спектра молекулы стандартна. В этом спектре необходимо найти метастабильный энергетический уровень, на котором можно накапливать концентрацию возбужденных молекул. Одновременно должен существовать ниже расположенный энергетический уровень, который удастся поддерживать в незаселенном состоянии. Тогда между этими уровнями создается инверсная населенность, необходимая для генерации лазерного излучения на определенной длине волны, соответствующей разности энергий между верхним и нижним уровнями.

Такие уровни существуют в колебательном спектре молекулы CO_2 , что и делает ее пригодной для создания лазерной среды. Энергия верхнего долгоживущего уровня, пригодного для накопления возбужденных молекул, равна 0,3 электрон-вольта (эВ). А нижних пригодных уровней оказалось два, их энергии почти одинаковы и близки к значению 0,2 эВ. Соответственно усиление и генерирование излучения может происходить на длинах волн либо 10,6 мкм, либо на 9,6 мкм в зависимости от используемого нижнего уровня. Задача Патела, над решением которой он долго трудился, состояла в том, чтобы найти способ и его техническое воплощение, обеспечивающее избирательное возбуждение верхнего лазерного уровня молекулы CO_2 при сохранении нижнего уровня незаселенным.

Трудности накачки и спасительная молекула N_2

Создать возбуждение колебательных уровней молекулы CO_2 удастся в плазме, образуемой электрическим разрядом. Но прямое возбуждение верхнего лазерного уровня при использовании известных типов электрического разряда в газах оказывается неэффективным. Процесс возбуждения осуществляется при столкновении электронов плазмы с молекулами CO_2 . Чтобы возбудить колебательный уровень с энергией, равной 0,3 эВ, необходимо, чтобы и энергия электронов в разряде в основном имела бы то же самое значение. Тогда вероятность неупругого соударения будет высокой. Энергии 0,3 эВ соответствует температура электронов порядка 3400 К. Это очень низкая температура, при которой не идут процессы ионизации газа, без чего разряд существовать не может. А при температуре, достаточной для протекания интенсивных процессов ионизации, например, 10000 К, возбуждение верхнего лазерного уровня молекулы проходит очень вяло. К тому же одновременно возбуждаются и все нижележащие колебательные уровни, что снижает и так невысокую инверсную населенность.

Пател нашел два великолепных решения, позволивших обойти эти трудности. Во-первых, он добавил к двууглекислому газу молекулярный азот в соотношении 1:1. Двухатомная молекула азота обладает уникальными свойствами, делающими ее незаменимым партнером в избирательном заселении верхнего лазерного уровня молекул CO_2 . Дело в том, что первый колебательный уровень N_2 имеет энергию, почти точно совпадающую с энергией верхнего лазерного уровня молекулы CO_2 (0,3 эВ), но этот уровень азота эффективно заселяется при энергии электронов в разряде порядка 2 эВ, то есть при энергии, достаточной также для эффективной ионизации газа. Второе свойство молекулы азота состоит в том, что указанный уровень метастабилен и имеет очень большое время жизни. В разряде, состоящем из смеси двух газов при средней энергии электронов 2 эВ возбуждаются молекулы азота, но не CO_2 , и они успевают эффективно передать свою энергию возбуждения молекулам CO_2 в процессах взаимных соударений. Тем самым обеспечивается прямое заселение возбужденными молекулами CO_2 верхнего лазерного уровня.

Во-вторых, Пател использовал для накачки газовой среды тлеющий разряд. Разряд этого типа отличается сильной неравновесностью: при высокой электронной температуре (~2 эВ), температура газа, состоящего из молекул, остается очень низкой (< 400 К), что исключает заселение нижних лазерных уровней термическим путем. Таким образом, применив смесь CO_2 и N_2 , возбуждаемых в тлеющем разряде, Пател решил проблему создания маломощного CO_2 лазера, обладающего высоким к.п.д. преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения в ИК области спектра (10% и более).

Борьба за повышение мощности CO_2 лазера

С момента своего создания и до настоящего времени CO_2 лазер остается одним из эффективных преобразователей энергии накачки в лазерное излучение. К тому же излучение в инфракрасной области спектра на длине волны порядка 10 мкм хорошо отвечает технологическим потребностям силовой обработки материалов. Создание такого лазера потребовало от Патела преодоления серьезных проблем. Но не менее серьезные усилия потребовались от тех, кто работал над проблемами многократного повышения мощности этого лазера, что позволило превратить его в серьезный инструмент, ставший основой многих технологических лазерных станков.

Каковы пути достижения больших мощностей? Для идеального случая, когда вся энергия накачки расходуется на возбуждение верхнего лазерного уровня, а нижние уровни остаются свободными, записывается такое простое соотношение, теоретически определяющее предельно достижимую мощность лазера P_{\max} :

$$P_{\max} = \beta E_i \frac{nV}{\tau} \quad (2)$$

Здесь $\beta = 0,41$ – квантовый к.п.д., определяющий способность молекулы превращать энергию возбуждения в квант вынужденного излучения; $E_i \sim 0,3$ эВ – энергия возбуждения верхнего лазерного уровня. Обе величины являются константами. Повышать предельную, а, следовательно, и реальную мощность лазера можно варьированием трех переменных величин: n – концентрация молекул CO_2 ; V – рабочий объем лазера; τ – время опустошения нижнего лазерного уровня. Для повышения мощности желательно увеличивать первые две из указанных величин и уменьшать третью величину. Для уменьшения τ следует интенсифицировать отвод тепла из зоны разряда.

1. Интенсификация охлаждения. Лазер Патела представлял собой стеклянную (кварцевую) трубку с электродами по краям и с торцами, герметично закрытыми оптически обработанными окнами, прозрачными для ИК излучений в области 10 мкм (рис.1).

Окна наклонены к оси трубки под углом Брюстера, что обеспечивает минимизацию в них оптических потерь. Отвод тепла из разряда осуществлялся радиально через боковые стенки трубки. Первый шаг в интенсификации отвода тепла был сделан путем добавления в активную среду значительного количества гелия, теплопроводность которого примерно на порядок превышает теплопроводность остальных газов. Ускоряя отвод тепла к стенкам, добавка гелия практически не влияла на параметры тлеющего разряда. Одновременно было осуществлено водяное охлаждение стенок. Радиус трубки при таком охлаждении не мог превышать 1,5 см. Поскольку $V = \pi R^2 L$, где L – длина разрядной части трубки, то расчетная предельная мощность на единицу длины составляла: $P_{\max}/L = 70$ Вт/м. С учетом того, что

реальная предельная мощность отличается от идеальной как минимум в 2 раза, для получения мощности в 1 кВт, длину трубки надо было бы увеличить до 30 м.

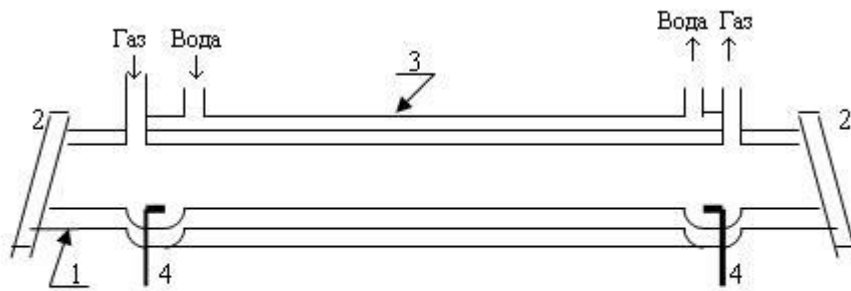


Рис. 1. Обозначения: 1 – стенки трубки; 2 – выходящие окна; 3 – водная рубашка; 4 – электроды.

2. Трудности увеличения концентрации молекул CO_2 в активной среде. Соотношение (2) показывает, что повышение концентрации активных молекул (n) в разряде должно приводить к пропорциональному повышению предельно достижимой мощности. Однако первоначально такой путь считался неосуществимым. Увеличение концентрации сопровождается повышением давления активной среды. Но как только давление превысит примерно 10 тор, тлеющий разряд скачком переходит в дуговую форму. Тогда прежний диффузный разряд стягивается к оси трубки, что сопровождается резким повышением температуры молекул при одновременном снижении температуры свободных электронов. Разряд становится равновесным, в нем распределение возбужденных молекул по квантовым уровням устанавливается в соответствии с распределением Больцмана (1), инверсная населенность исчезает. В ходе дальнейших исследований удалось найти способ сохранения неравновесной диффузной формы разряда при давлениях газовой смеси от сотен тор до атмосферного.

3. Поперечная прокачка газа и поперечный электрический разряд. Кардинального решения проблемы повышения мощности лазера удалось добиться после того, как были внедрены два принципиально новые физико-технические решения. Первое состояло во внедрении поперечной скоростной прокачки газа через зону разряда.

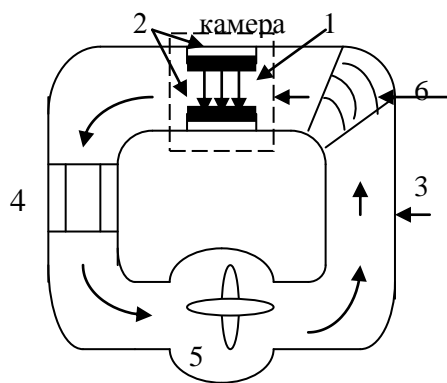


Рис. 2

Второе – одновременное с этим введение поперечного электрического разряда. Оба решения привели к революционным изменениям самого облика CO_2 лазера. Вместо архаичных стеклянных трубок стали применяться разрядные камеры, изготавливаемые из пластмасс, стеклопластиков или металлов с внутренней диэлектрической футеровкой. Камеры обеспечивали организацию разряда при больших сечениях разрядной области, что позволяло существенно уменьшить длину лазера. Однако достигнутый прогресс потребовал пожертвовать простотой технических решений прежнего периода.

Поперечное сечение камеры, приведенное на рис.2, поясняет подобное утверждение. К разрядной камере (1) пристыковывается газодинамический тракт (3). В состав тракта входит теплообменник (4), вентилятор (5) и аэродинамическая решетка (6), выравнивающая поток газа перед входом в разрядную камеру. Поперечный поток газа и поперечный электрический разряд, протекающий между электродами (2), располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поперечный поток газа дает возможность значительно уменьшить время выноса тепла из зоны разряда и несколько увеличить скорость потока, что в несколько раз повышает предельную мощность по сравнению с прежними простыми вариантами. Но появляются и определенные недостатки. Возникает смещение зоны разряда в

потоке газа, что необходимо учитывать при установке зеркал оптического резонатора. Величина смещения зависит от скорости потока и если скорость меняется, то может возникнуть определенная разъюстировка.

В режиме непрерывной генерации стабильность разряда обеспечивается в узком интервале давления газовой смеси, силы разрядного тока, соотношения компонентов газовой смеси. Нестабильность становится одним из решающих факторов, ограничивающих не только предельно достижимую мощность, но и надежность работы лазера. Устраняется неустойчивость путём перехода к частотно-импульсному режиму разряда. К этому добавились особые мероприятия. Они определились после того, как выяснилось, что повышение устойчивости разряда и одновременное расширение области давлений активной среды, в которой сохраняется его неравновесное состояние, можно достигнуть, разделив процессы возбуждения молекул и ионизации разрядной среды. Оба процесса осуществляются при неупругих столкновениях свободных электронов с молекулами газа. Но оптимальность возбуждения и оптимальность ионизации требуют от электронов заметно отличных энергетических характеристик. Совместить эти требования в одном разряде не удастся. Выход из создавшегося положения был найден в решении использовать отдельный источник дополнительной ионизации среды. В технологических лазерах таким источником служит дополнительный ионизирующий разряд, например, высокочастотный разряд. При этом удаётся снизить напряженность основного разряда, осуществив тем самым оптимизацию возбуждения молекул в среде.

В заключение остается отметить, что сегодня существуют надежно работающие CO_2 лазеры с выходными мощностями от сотен ватт до 5 киловатт и более. Они успешно используются в широко применяемых лазерных станках, предназначенных для обработки различных материалов, как металлов, так полупроводников и диэлектриков.