

CHEMICAL LASERS

A. N. ORAEVSKY

The principles of chemical lasers are discussed. Design peculiarities and the main ways of applications of the most advanced systems are described.

Обсуждаются принципы работы химических лазеров. Описываются конструктивные особенности наиболее разработанных систем и основные пути их применений.

ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

А. Н. ОРАЕВСКИЙ

Московский инженерно-физический институт

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Химическая энергия занимает особое место в жизни общества. Основным источником энергии сегодня — это химическая реакция. Тепловые электростанции используют химическую энергию, которая испытывает при этом многоступенчатые превращения: химическая—тепловая—механическая—электрическая. Практически все существующие типы лазеров основаны на прямом или косвенном использовании электрической энергии. Химический лазер — это устройство, прямо преобразующее химическую энергию в энергию когерентного излучения, минуя другие виды энергии.

В любом типе лазера¹ необходимо сначала ввести энергию накачки в рабочую среду, а затем извлечь ее оттуда в виде когерентного излучения. Ввод достаточно большого количества энергии в рабочую среду лазера — самостоятельная и часто сложно решаемая задача. Так как в химической смеси уже содержится энергия, нужно лишь найти эффективный способ ее выделения в виде когерентного излучения.

Для создания химического лазера нужна такая реакция, которая идет с выделением достаточно большой энергии, причем в процессе реакции должны возникать элементарные продукты (молекулы, радикалы, атомы) в возбужденных энергетических состояниях, связанных с внутренними степенями свободы. Более того, распределение по этим состояниям должно быть инверсным. Это значит, что хотя бы в одном из состояний, обладающих большей энергией, молекул должно быть больше, чем в одном из состояний с меньшей энергией.

Рассмотрим, как образуются инверсное распределение в процессе химической реакции на примере двухатомной молекулы. Двухатомная молекула обладает одной колебательной, двумя вращательными и тремя поступательными степенями свободы. Как известно из квантовой механики, внутренняя энергия атома или молекулы имеет дискретные значения. Это общее положение относится и к энергии колебательного и вращательного движений. Колебательно-вращательные энергетические состояния двухатомной молекулы и тепловое распределение молекул по энергетическим состояниям показаны на рис. 1, а. Длина горизонтальных линий на рисунке характеризует относительное число молекул с определенным значением энергии. Химическая реакция

¹ Ввиду ограниченного объема статьи мы не имеем возможности излагать общие сведения о принципах работы и конструкции лазеров и отсылаем читателей к статьям [1–4].

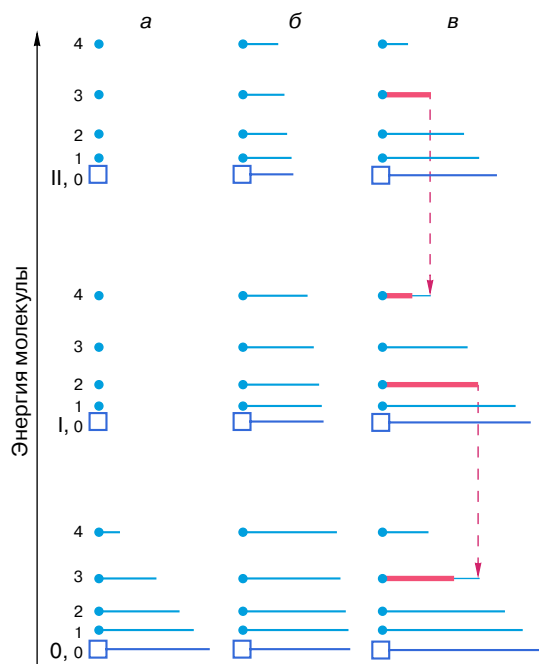


Рис. 1. Схема колебательных и вращательных энергетических состояний двухатомной молекулы. Квадратики обозначают значения колебательной энергии, они пронумерованы по мере возрастания энергии римскими цифрами. К колебательной энергии добавляется энергия вращения молекулы (точки, арабские цифры). Интервалы между значениями колебательной энергии (на рисунке показаны лишь три значения) уменьшаются по мере увеличения энергии. Интервалы между вращательными энергетическими состояниями возрастают по мере увеличения энергии

должна быть такой, чтобы выделяющаяся в ходе ее энергия сосредоточивалась прежде всего в возбужденных колебательных состояниях. Первоначальное распределение по уровням энергии может быть различным, но в процессе соударений между собой молекулы очень быстро распределяются так, как показано на рис. 1, б. В дальнейшем при соударениях между молекулами энергия начинает переходить из вращательно-колебательного резервуара в поступательные степени свободы, но вращательная энергия переходит в поступательную намного быстрее, чем колебательная энергия. В результате колебательные степени свободы остаются горячими, а вращательные быстро остывают. Поэтому большинство молекул оказывается сосредоточенным на низких вращательных уровнях. Это состояние показано на рис. 1, в. Видно, что в результате остывания вращательных степеней свободы заселенность определенных более высоких уровней энергии оказывается больше, чем некоторых более низких. Например, на рис. 1 заселенность состояния (I, 2) превышает заселенность состояния (0, 3), более низкого по энергии. То же можно сказать и об уровнях (II, 3) и (I, 4).

Такое распределение является инверсным. Именно в этот момент и возникает генерация когерентного излучения в химическом лазере.

Мы видим, что чем эффективнее переходит энергия из вращательных степеней свободы в поступательные, тем благоприятнее условия для работы лазера. Значит, выгодно, чтобы поступательные степени свободы не слишком сильно разогревались. Поэтому в рабочую смесь химического лазера добавляют разбавитель, химически инертный по отношению к реагирующим веществам. Роль его лишь в том, чтобы предотвратить резкий разогрев поступательных степеней свободы молекул в реагирующей смеси.

Распределение молекул по энергетическим состояниям, показанное на рис. 1, в, является неравновесным и может существовать лишь малое время, по истечении которого распределение становится равновесным — химически реагирующая смесь просто нагреется и не будет способна к усилению электромагнитного излучения. Поэтому для реализации описанного механизма возникновения усиливающей лазерной среды необходимы очень быстрые химические реакции, скорость протекания которых больше, чем скорость установления теплового равновесия в лазерной среде. Оказывается, что такими скоростями могут обладать только реакции с участием очень активных частиц — свободных атомов или радикалов. Наилучшей среди них оказалась реакция фторирования водорода.

Другой способ создания активной лазерной среды основан на передаче энергии от одной молекулы к другой частице (молекуле или атому). Рассмотрим этот способ на примере передачи энергии от молекулы фтористого дейтерия (DF) к молекуле углекислого газа CO_2 . На рис. 2 условно изображены колебательные энергетические состояния этих молекул. Молекула DF в результате химической реакции водорода с фтором оказывается колебательно-возбужденной. Частота ее колебаний близка к частоте антисимметричных колебаний молекулы CO_2 . Поэтому при соударениях DF с CO_2 в последней возбуждаются как раз антисимметричные колебания и она оказывается в энергетическом состоянии II', соответствующем возбуждению именно этих колебаний. Состояние III' соответствует симметричным колебаниям. Их частота далека от частоты колебаний DF, и при столкновениях CO_2 с DF состояние III' практически не возбуждается. Таким образом, в молекуле CO_2 возникает инверсная заселенность уровня II по отношению к уровню III' и лазерное излучение будет генерироваться за счет переходов между уровнями энергии в молекуле CO_2 ¹. Смысл

¹ Во избежание недоразумения отметим, что молекула CO_2 обладает еще и так называемыми деформационными колебаниями, которые не принимают прямого участия в образовании инверсной заселенности.

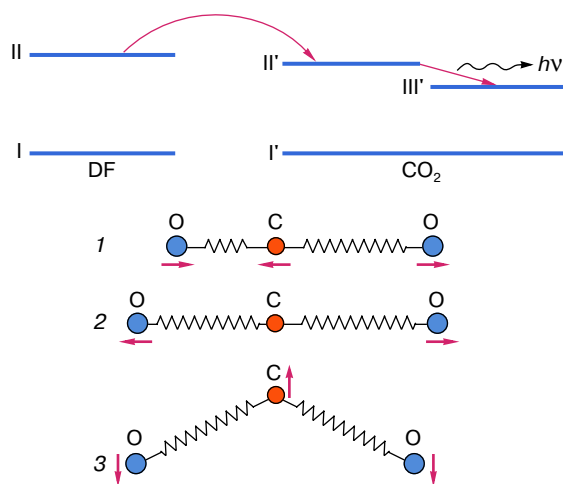


Рис. 2. Возникновение инверсии при передаче колебательной энергии от молекул DF молекулам CO_2 : 1 – антисимметричные; 2 – симметричные; 3 – деформационные колебания молекулы CO_2 . Римскими цифрами обозначены колебательные уровни энергии

такого механизма создания инверсной населенности в том, что инверсное распределение в молекулах CO_2 сохраняется гораздо дольше, чем в молекуле DF. К тому же для образования инверсного распределения в молекуле CO_2 не требуется инверсного распределения в молекулах DF. Заметим, что рассмотренный механизм образования инверсно населенных молекул тождествен механизму в CO_2 -лазере, возбуждаемом электрическим разрядом [4]. Другой пример подобного же механизма образования активной лазерной среды путем передачи энергии от молекулы кислорода к атому иода рассмотрен в одном из следующих разделов.

КАК ОРГАНИЗОВАТЬ ХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В ЛАЗЕРЕ

Химически активные радикалы не встречаются в природе в свободном состоянии (исключением является радикал NO). Их можно получить разбив стабильную молекулу на составные части. Для этого нужно затратить энергию, равную энергии диссоциации (разрыва связи) этой молекулы. Получившиеся таким образом радикалы вступят с другими молекулами в реакцию, в процессе которой и возникнет активная среда. Например, условная молекула AB за счет затрат энергии (электрический разряд, фотолиз, нагрев) разбивается на составные части: $\text{AB} + Q \rightarrow \text{A} + \text{B}$, где Q – любой вид энергетических затрат. Образующийся активный радикал или атом (пусть это будет A) вступает с молекулой C в химическую реакцию, в результате которой образуется возбужденная молекула AC, способная к излучению: $\text{A} + \text{C} \rightarrow \text{AC}^*$. В соответствующих усло-

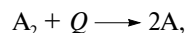
виях она отдает запасенную в ней энергию в виде кванта лазерного излучения¹

$$\text{AC}^* + nh\nu = \text{AC} + (n + 1)h\nu.$$

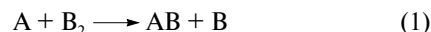
Это и есть простейшая кинетическая схема химического лазера.

Но мы не добились в этой схеме решения основной задачи – создать лазер, потребляющий только (или в основном) химическую энергию: ведь получение радикалов требует энергетических затрат. Из этой трудной ситуации удалось найти два выхода.

Первый из них – использовать цепную химическую реакцию, то есть такую реакцию с участием радикалов, в процессе которой они возобновляются. Рассмотрим смесь двух условных молекул A_2 и B_2 . Без инициирования реакция в этой смеси не начинается. Затратив энергию (осветив, например, смесь ультрафиолетовым излучением), мы создадим в ней свободные атомы (радикалы):



которые начинают реакцию



В результате образуется опять химически активная частица B (атом или радикал), которая продолжает реакцию:

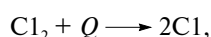


Исходная активная частица A восстановлена, и процесс может повторяться. Возникает цепочка таких процессов – идет цепная реакция. Если в этих реакциях за счет выделяющейся энергии создаются возбужденные молекулы AB^* , то такой процесс может быть использован для генерации лазерного излучения. При большом числе звеньев в реакции на каждый атом (радикал) A, созданный в начале процесса за счет дополнительной энергии, может получиться очень много возбужденных молекул AB^* , и энергия лазерного излучения может в принципе намного превышать затраты на инициирование реакции. Реальная цепь, естественно, небесконечна. Есть ряд причин ее обрыва. Например, два атома A, взаимодействуя друг с другом, могут снова образовать молекулу A_2 и выбыть из цепного процесса. С чисто химической точки зрения обрыв цепи всегда связан с исчезновением химически активной частицы. Однако существует много цепных химических реакций с очень большой длиной цепи, когда каждая первоначально созданная химически активная частица за время своего существования успевает осуществить десятки–сотни тысяч процессов типа (1) или (2). Но

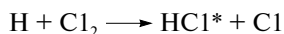
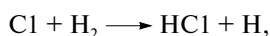
¹ Здесь и далее уравнение такого вида условно описывает генерацию излучения в лазере: под действием n квантов излучения $h\nu$ молекула отдает запасенную в ней энергию в виде дополнительного кванта.

в лазерном случае все оказывается не так просто. Конечная цель химической реакции, используемой в химическом лазере, — лазерное излучение. С этих позиций важно не то, сколько продукта реакции (в нашем примере молекул АВ) создано за время существования атома А, а то, сколько возбужденных молекул АВ* успеют испустить квант лазерного излучения. Таким образом, полезная длина цепного процесса с обычной химической (количество конечного продукта) и лазерной точек зрения определяется по-разному: в первом случае это отношение скорости отдельного звена реакции к скорости гибели активной частицы (химическая длина цепи), а во втором — к скорости девозбуждения излучающих молекул (хемолазерная длина цепи). А это означает, что не всякий цепной химический процесс будет цепным с точки зрения генерации лазерного излучения. Среди множества цепных химических процессов надо выбрать процесс с большой хемолазерной длиной цепи.

Первый химический лазер был основан на реакции в смеси молекулярного водорода и хлора: $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$. Эта реакция — классический представитель цепных химических процессов. Она развивается следующим образом. Ультрафиолетовым излучением небольшая часть молекул хлора разлагается на атомы:

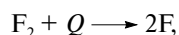


которые начинают реакцию с длинной цепью



В первом звене этого процесса молекулы HCl получаются невозбужденными. Во втором звене выделяется довольно много энергии, так что молекулы HCl оказываются возбужденными (отмечено звездочкой), и за этот счет происходит генерация лазерного излучения. Казалось бы, все в порядке: цепной процесс заработал сразу в первом же химическом лазере. На деле же оказалось, что затраты энергии на создание атомов хлора в сотни раз превосходили энергию лазерного излучения. Выяснилось, что в этой реакции сравнительно медленно протекает первое звено, и поэтому развитие цепи в целом уступает по скорости процессам, дезактивирующим возбужденные молекулы. Таким образом, с лазерной точки зрения химическая реакция в смеси молекул водорода и хлора не является цепной.

Реакцию с большой хемолазерной длиной цепи удалось найти используя смесь молекул водорода (или дейтерия) и фтора. Кинетически развитие цепного процесса в этой смеси полностью подобно развитию цепи в смеси водорода и хлора:



Отличие состоит в том, что в обоих звеньях цепи получают колебательно-возбужденные молекулы HF* или DF*. Энергия, выделяющаяся в процессе реакции водорода с фтором, в три раза превышает энергию реакции водорода с хлором. И наконец, наиболее важное обстоятельство: скорость обоих звеньев реакции водорода с фтором выше скорости релаксационных процессов. Это и обуславливает возникновение длинной хемолазерной цепи во фторводородном процессе.

В рассмотренном примере свободные химически активные частицы (атомы F) создавались за счет затрат энергии. Но получить их можно и чисто химическим путем. Составим, например, смесь водорода H_2 и фтора F_2 со значительным избытком фтора. При горении этой смеси выделится большое количество энергии — смесь нагреется. При температуре в 1500–2000 К и давлении 1–20 атм практически весь избыток молекулярного фтора диссоциирует на атомы, так что основными компонентами прореагировавшей смеси будут HF и атомарный фтор F. Заметим, что на этом этапе никакого неравновесного возбуждения молекул в итоге не происходит — вся энергия химической реакции затрачивается на диссоциацию молекул фтора и нагрев смеси.

Получив большое количество атомарного фтора, можно организовать быстрый химический процесс $\text{F} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{HF}^* + \text{H}$ с получением неравновесно возбужденных молекул HF* и в конечном счете лазерного излучения. Но как это сделать? Реакции с участием радикалов очень быстры, и предварительное смешение реагентов практически невозможно. На помощь приходит техника смешения реагентов в быстрых газовых потоках. В нашем случае приготовленный атомарный фтор нужно выпустить в виде струи разреженного газа и смешать ее со струей молекулярного водорода. Тогда в зоне смешения этих струй будет протекать указанная выше реакция с образованием активной лазерной среды. Процесс будет нецепным, если весь фтор находится в атомарном состоянии. Можно организовать и цепной процесс. Для этого нужно понизить температуру сгорания смеси, что легко сделать уменьшив в ней относительное содержание молекулярного водорода или разбавив ее, например, гелием (см. ниже). При температуре 1000–1200 К в атомарное состояние перейдет только малая часть фтора (5–10%), так что с молекулярным водородом будет смешиваться и атомарный и молекулярный фтор и возникнет цепной процесс по ранее описанной схеме.

Метод получения химически активных центров путем диссоциации молекул за счет тепла химической реакции выглядит универсальным. Однако природа не предоставила здесь большого выбора.

Дело в том, что температура, необходимая для диссоциации молекул, резко возрастает по мере увеличения энергии диссоциации. Молекула фтора F_2 имеет относительно малую энергию диссоциации, поэтому в диапазоне температур 1500–2000 К фтор может быть полностью разложен на атомы при любых практически интересных давлениях. Но, например, для диссоциации молекулы водорода на атомы при давлении порядка атмосферного требуется температура выше 4000 К. Такие температуры создают технические трудности, да и получить их за счет химической энергии непросто.

ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ НЕПРЕРЫВНОГО¹ ДЕЙСТВИЯ

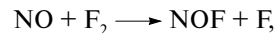
Чтобы получать генерацию в химическом лазере продолжительное время, необходимо достаточно быстро менять реагенты в реакторе и уметь производить химически активные центры непрерывно в течение всего времени работы лазера. Поскольку реакции с участием радикалов очень быстры, то для смены вещества в реакторе нужны околосвуковые или даже сверхзвуковые скорости прокачки.

Химический лазер продолжительного действия состоит из источника химически активных центров; системы смешения свободных атомов или радикалов с другим компонентом, реакция с которым дает возбужденные молекулы; реактора, где создается активная лазерная среда, и оптического резонатора. Кроме того, нужны быстрая подача исходных и откачка отработанных реагентов.

Рассмотрим, как практически реализуется эта общая схема в различных типах химических лазеров продолжительного (непрерывного) действия.

¹ Такой термин утвердился в литературе. Но ясно, что речь идет о лазере, который генерирует не бесконечно долго, а в течение достаточно длительного времени. Поэтому удачнее было бы использовать термин “лазер продолжительного действия”.

(DF–CO₂)-лазер. В основе этого лазера лежит передача энергии от колебательно-возбужденных молекул DF^* молекулам CO_2 в смеси $D_2 + F_2 + CO_2$. Реакцию инициирует радикал:



а затем идет цепная реакция дейтерия с фтором, описанная ранее. Полученные в результате реакции молекулы DF^* быстро передают энергию молекулам CO_2 , которые и служат излучателем. Схема устройства такого лазера показана на рис. 3, а его характеристики – в табл. 1.

Если в реагирующую смесь не вводить молекулы углекислого газа, можно в этой же схеме лазера получить генерацию и за счет излучения молекул DF^* . Однако опыты показали, что работающие по такой схеме DF (или HF)-лазеры заметно уступают $(DF-CO_2)$ -лазеру. Дело в том, что возбужденные молекулы CO_2^* живут заметно дольше, чем молекулы DF^* или HF^* , так что при добавлении в смесь молекул CO_2 хемолазерная длина цепи заметно возрастает. Для получения же генерации путем излучения молекул HF (DF) более эффективным оказывается тепловой способ получения атомарного фтора (тепловое инициирование реакции).

HF(DF)-лазер с тепловым инициированием реакции. Схема такого лазера представлена на рис. 4. В камеру сгорания вводятся молекулярный фтор, водород и гелий. Фтор находится в большом избытке

Таблица 1

Оптимальные объемные соотношения реагентов	$NO : F_2 : D_2 : CO_2 : He = 1 : 6 : 5 : 45 : 100$
Скорость потока реагентов	$2 \cdot 10^4$ см/с
Ширина зоны генерации	5 см
Химический КПД	4–5%
Мощность на грамм расходного вещества	50–60 Вт/г

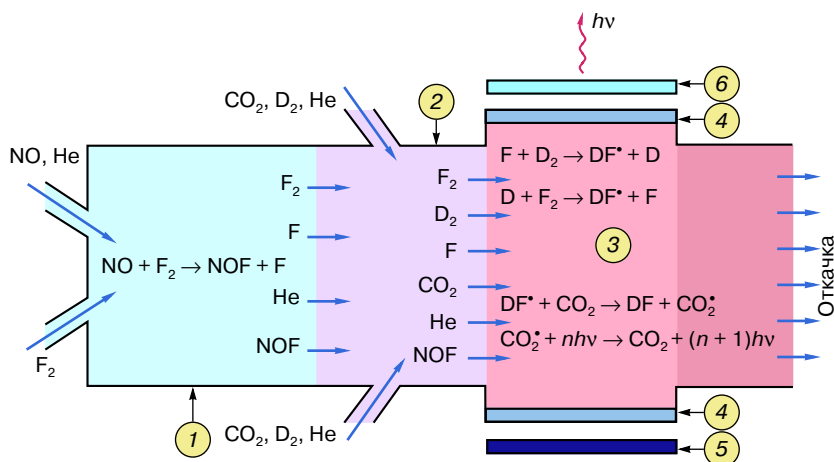


Рис. 3. Схема химического $(DF-CO_2)$ -лазера продолжительного действия, работающего на цепной реакции фторирования дейтерия: 1 – камера наработки атомарного фтора, 2 – смесительная камера; здесь и на рис. 4 и 5: 3 – зона реактора (лазерная зона), 4 – окна для вывода излучения в резонатор, 5 – глухое зеркало резонатора, 6 – полупрозрачное зеркало резонатора

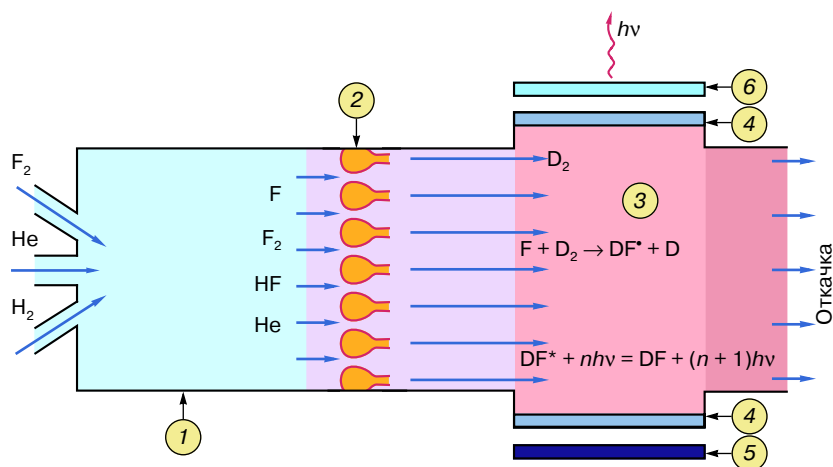


Рис. 4. Схема HF(DF)-лазера с тепловым иницированием реакции: 1 – камера сгорания, где нарабатывается атомарный фтор; 2 – сопловой блок для охлаждения потока и смешения химических реагентов

по отношению к водороду. В камере происходит обычное равновесное горение водорода во фторе с выделением тепла, достаточного для диссоциации избытка молекулярного фтора. О роли гелия будет сказано ниже.

Соотношение компонентов в камере сгорания подбирают таким, чтобы обеспечить практически полную диссоциацию избытка молекул фтора (степень диссоциации больше 95%). Для этого требуется температура 1500–1800 К. Реакцию в сильно нагретой смеси нельзя использовать для создания активной среды: смесь необходимо охладить. Для этого ее пропускают через набор сопел (сопловую решетку), разгоняя в них поток до сверхзвуковых скоростей, что сопровождается охлаждением газа. На выходе из сопел к сверхзвуковому потоку примешивается поток молекул дейтерия. В результате смешения этих двух потоков и образуется рабочая смесь, реакция в которой $F + D_2 \rightarrow DF^* + D$ приводит к образованию колебательно-возбужденных молекул фтористого дейтерия, генерирующих лазерное излучение.

Ключевая проблема здесь – процесс смешения. Он должен быть быстрым. Поэтому сопловой блок – это не отдельное сопло, а сопловая решетка, состоящая из маленьких сопел, разбивающих общий поток на струи малого сечения – порядка 1–2 мм. Дейтерий тоже подается в виде струй малого сечения, что и обеспечивает достаточно эффективное смешение реагентов.

Разгон струи в сопловом блоке решает и другие задачи. Реакция атомарного фтора с дейтерием очень быстра. При малой скорости потока ширина активной (генерирующей) зоны в направлении потока оказывается малой и получить лазерный луч трудно. При практически достигаемой сверхзвуковой скорости потока $>10^5$ см/с и давлении реагентов в зоне генерации в 5–10 торр ее ширина составляет несколько сантиметров, а это вполне приемлемо для получения луча хорошего качества. Сверхзвуко-

вой поток обеспечивает к тому же и быструю прокачку вещества, позволяя получить большие мощности излучения при относительно небольших поверхностях сопловых решеток.

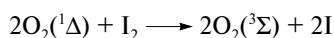
Зачем же нужен гелий? Дело в том, что в реакции атомарного фтора с дейтерием выделяется значительная энергия. Часть этой энергии (около 15%) уносится лазерным излучением. Остальная часть в конечном счете нагревает поток. Из газовой динамики известно, что нагрев может сильно затормозить сверхзвуковую струю и даже подавить процесс сверхзвукового истечения (переведя его в дозвуковой). А это полностью расстроит гармонию условий, необходимых для генерации лазерного излучения. Разбавление сверхзвуковой струи инертным газом, который не вступает в химическую реакцию и уменьшает количество тепла, выделяющегося на единицу массы газового потока, предотвращает опасный перегрев, приводящий к срыву сверхзвукового течения.

Чтобы не возникало недоразумений, отметим, что молекулы HF, выходящие с потоком атомарного фтора и гелия из камеры сгорания, лишь сопутствующий продукт реакции. Они не являются излучателями в лазере и, более того, играют в дальнейшем отрицательную роль, дезактивируя возбужденные молекулы в лазерной зоне. Такая дезактивация происходит особенно активно, если излучают колебательно-возбужденные молекулы того же сорта. Именно поэтому в лазерную зону вводится дейтерий, если в камере сгорания в качестве горючего использовался водород. Если же необходимо получить генерацию непременно на фтористом водороде, то в камере сгорания нужно использовать либо дейтерий, либо другое горючее, но такое, чтобы среди продуктов реакции не было молекул, сильно “тушащих” колебательно-возбужденные молекулы HF*. В табл. 2 приведены типичные параметры HF(DF)-лазера.

Таблица 2

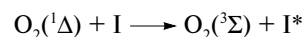
Степень разбавления смеси гелием	1 : 10–20
Скорость истечения реагентов	$2 \cdot 10^5$ см/с
Температура в камере сгорания	1500–2000 К
Давление в лазерной зоне	5–20 торр
Мощность на грамма расходуемого вещества	100–200 Вт/г

Кислород-иодный лазер использует энергию синглетного кислорода¹. Существует большое количество химических реакций, одним из продуктов которых является синглетный кислород. Их скорость мала по сравнению с реакцией фторирования водорода. Но и живет синглетный кислород намного дольше колебательно-возбужденной молекулы фтористого водорода. Каждая молекула синглетного кислорода несет в себе запас энергии примерно в 1 эВ. Прямым путем эту энергию использовать не удастся, так как синглетный кислород плохо излучает (поэтому он и живет долго). Поэтому поступают следующим образом: к потоку синглетного кислорода примешивают поток молекул иода I_2 , за счет энергии синглетного кислорода молекула иода разбивается на атомы. Этот процесс происходит достаточно быстро. Для диссоциации одной молекулы иода необходима энергия двух молекул синглетного кислорода:



Образовавшиеся атомы иода при столкновении с синглетным кислородом переходят в возбужденное состояние. Этот процесс тоже проходит очень эффективно:

¹ Синглетный кислород — это молекула кислорода, находящаяся в первом электронно-возбужденном состоянии. Обозначается она обычно символом $O_2(^1\Delta)$. Нормальная (невозбужденная) молекула кислорода обозначается как $O_2(^3\Sigma)$.



Возбужденный атомарный иод и образует активную среду лазера. Принципиальная схема кислород-иодного лазера приведена на рис. 5. Синглетный кислород в этой схеме получается за счет пропуска ("пробулькивания") молекулярного хлора через смесь перекиси водорода со щелочью.

Отметим одно обстоятельство, очень важное для эффективной работы кислород-иодного лазера. Может возникнуть впечатление, что на каждый квант, излученный атомом иода, надо затратить два кванта синглетного кислорода. Действительно, один квант идет на создание атома иода (два кванта — на диссоциацию молекулы иода, в результате которой получаются два его атома) и еще один квант — на его возбуждение. На самом деле это не так: получив энергию от кислорода и излучив ее, атом иода снова готов к работе. Можно подобрать давление реагентов в смеси так, что атом иода многократно совершит излучающий цикл прежде, чем два атома иода снова объединяются в молекулу I_2 . Поэтому затраты энергии на диссоциацию молекулы иода могут быть сделаны очень малыми по сравнению с энергией излучения. В результате один литр смеси перекиси водорода со щелочью способен дать до $(5-10) \times 10^4$ Дж энергии лазерного излучения.

ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

Эти лазеры, как и импульсные лазеры любого другого типа, предназначены для получения короткого мощного импульса когерентного излучения. Импульсный химический лазер состоит из следующих основных узлов: реактора, где должна протекать быстрая химическая реакция, в процессе которой возникает активная среда, оптического резонатора, системы инициирования реакции, приготовления и впуска смеси реагентов в реактор, удаления отработанных продуктов.

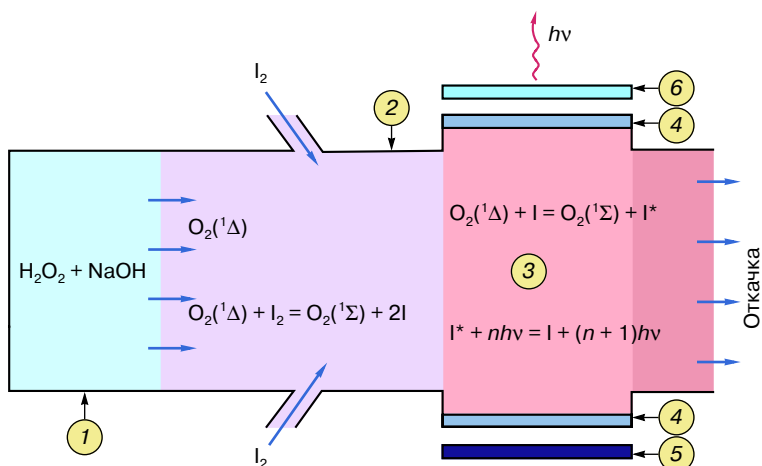


Рис. 5. Схема химического кислород-иодного лазера: 1 — генератор синглетного кислорода (последний получается с помощью реакции $H_2O_2 + 2NaOH + Cl_2 \longrightarrow 2H_2O + 2NaCl + O_2(^1\Delta)$); 2 — блок смешения кислорода с молекулярным иодом

На рис. 6 показана типичная схема такого лазера. Химические компоненты, указанные на схеме, могут быть заменены и другими. Инициирование реакции в приведенной схеме осуществляется ультрафиолетовым излучением импульсной лампы. Можно также инициировать реакцию потоком электронов высокой энергии или электрическим током, пропускаемым через смесь химических реагентов в реакторе.

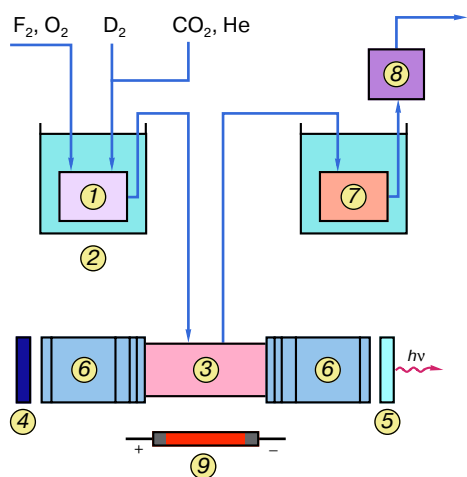


Рис. 6. Схема химического лазера импульсного действия: 1 – смеситель, 2 – холодильник, 3 – реактор, 4 – глухое зеркало, 5 – частично прозрачное зеркало для вывода излучения, 6 – держатели окон и камеры защиты окон от коррозии продуктами реакции, 7 – гаситель пламени, 8 – химический поглотитель, 9 – импульсная лампа – источник иницирующего излучения

Какие же химические смеси применяются для импульсных химических лазеров? Как уже отмечалось, для получения эффективного химического лазера с малыми затратами на инициирование реакции необходимо использовать цепные химические реакции с большой хемолазерной длиной цепи. Этим свойством обладают смеси $H_2 + F_2$, $D_2 + F_2$, $D_2 + F_2 + CO_2$.

Смеси, используемые на практике, как правило, сложнее. Так, в указанные три смеси для их стабилизации добавляется кислород O_2 в пределах нескольких процентов от общего объема смеси. Часто в смесь добавляют инертный буферный газ для того, чтобы предотвратить сильный разогрев смеси и ускорить релаксационные процессы, способствующие созданию активной лазерной среды. При инициировании реакции потоком электронов добавляют в смесь молекулы с большим молекулярным весом для увеличения концентрации химических активных центров и т.д.

В качестве примера приведем характеристики лазера на основе цепной фторводородной реакции (табл. 3). КПД использования энергии иницииро-

Таблица 3

Параметр лазера	Умеренное инициирование	Мощное инициирование
Удельный энергосъем	100 Дж/(л · атм)	400 Дж/(л · атм)
Химический КПД	7%	22%
КПД использования энергии инициирования	940%	150%
Длительность импульса генерации	10^{-6} с	$3 \cdot 10^{-8}$ с

вания носит название коэффициента полезного действия условно: он может (а для хорошего химического лазера должен!) превышать единицу, так как энергия, генерируемая лазером, черпается не из энергии инициирования, а из химической энергии, запасенной в реакторе.

Характеристики импульсных химических лазеров являются рекордными для газовых лазеров. Но основной недостаток импульсного химического лазера по сравнению с лазером непрерывного действия состоит в том, что импульсный лазер пока не удалось сделать чисто химическим. Тем не менее есть идея создания такого лазера. Она состоит в том, чтобы заставить излучение, генерируемое лазером, быть не только конечным продуктом системы, но и участвовать в развитии самой химической реакции, разбивая содержащиеся в смеси молекулы на химически активные радикалы. Тогда источником иницирующей энергии в конечном счете будет тоже химическая реакция и импульсный лазер будет чисто химическим. Теоретические исследования показывают, что и эта схема принципиально осуществима, однако реализовать ее на практике пока не удалось. Реализация ее – одна из интереснейших проблем в области химических лазеров.

ЧЕМ ИНТЕРЕСНЫ ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

Хотелось бы взглянуть на химические лазеры не с утилитарной, а с теоретической точки зрения. Химические реакции, сопровождаемые испусканием инфракрасного, видимого и даже ультрафиолетового излучения, были известны и в долазерный период. Создание химических лазеров показало, что это излучение может быть когерентным. Разные виды энергии имеют различное “качество”. В науке существует мера качества энергии – энтропия. Чем меньше энтропия, тем более высокого качества энергия. В состоянии теплового равновесия энтропия максимальна для данного количества энергии, поэтому тепло является энергией самого низкого качества. В течение сотен лет использования химической энергии утверждался взгляд на нее как на источник тепла. Исследования, стимулируемые развитием химических лазеров, убеждают в том, что широкий класс химических реакций является источником

низкоэнтропийной энергии — энергии высокого качества. Этот вывод должен стимулировать дальнейшие поиски новых, более рациональных путей использования химической энергии.

С утилитарной точки зрения прежде всего отметим то обстоятельство, что самым мощным из лазеров непрерывного действия, которые удалось создать исследователям и инженерам, является химический HF-лазер с тепловым инициированием реакции. На основе мощных химических лазеров могут быть созданы специализированные технологические системы. Химические лазеры с их энергетической автономией и большой удельной энергией смогут, по-видимому, применяться в лазерной космической технологии.

Как ни подвергается критике в настоящее время ядерная энергетика, пока альтернативы ей в энергетике будущего не найдено. Один из вариантов использования ядерной (термоядерной) энергии состоит в строительстве электростанций в удалении от мест плотного проживания. В этих местах энергия ядерного реактора преобразуется в химическую путем разложения воды на водород и кислород. Водород как горючий газ доставляется потребителю по газопроводу. Так как в таком проекте основным видом горючего, добываемого с помощью ядерной энергии, представляется водород, то создание химического лазера на основе реакции окисления водорода выглядит весьма заманчиво. По-видимому, наряду с созданием чисто химического лазера импульсного действия это одна из самых интересных (но и очень трудных) задач в области химических лазеров.

В статье описаны химические лазеры, имеющие наилучшие характеристики и являющиеся наиболее развитыми в инженерном отношении. Но существуют и другие системы химических лазеров, среди них лазеры на основе реакции окисления се-

роуглерода, в котором излучателем являются молекулы CO. Он привлекает внимание с точки зрения особенностей кинетики химической реакции. Интересен лазер, основанный на передаче энергии от колебательно-возбужденных радикалов OH* молекулам CO₂. Может быть, он является первым шагом на пути создания лазера на основе реакции окисления водорода. HF-лазер, в котором используется смесь молекул водорода и фтористой серы (SF₆), выпускается для медицинских применений. Более подробные сведения об этих и других типах химических лазеров читатель может найти в книгах [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. Ст. "Лазер".
2. Химическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. Ст. "Лазер".
3. Сэм М.Ф. Лазеры и их применения // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 6. С. 92–98.
4. Райзер Ю.П. Мощные электроразрядные лазеры на углекислом газе // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 8. С. 99–104.
5. Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса, Дж. Ботта. М.: Мир, 1980.
6. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. Химические лазеры. М.: Наука, 1982.

* * *

Анатолий Николаевич Ораевский, доктор физико-математических наук, профессор МИФИ, главный научный сотрудник и зав. сектором ФИАН, действительный член Российской академии естественных наук, лауреат Ленинской премии. Область научных интересов – лазерная физика, химические лазеры, лазерная химия, нелинейная динамика и теория сверхпроводимости. Автор и соавтор более 400 научных публикаций, 20 изобретений и пяти монографий.