

Лабораторные импульсные химические лазеры. (Обзор). Лукашенко С. В., Мартиросов В. А., Озеров Л. Н. — В кн.: Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента. Л., «Наука», 1982, с. 79—88.

Рассмотрены основные работы по импульсным химическим лазерам в период с 1970 по 1980 г. Проанализированы основные закономерности наработки возбужденных молекул HF ( $\nu$ ) и кинетика их релаксация на различные компоненты активной газовой смеси в свете последних экспериментальных данных. Дан сравнительный анализ различных моделей химических лазеров. Обсуждены способы уменьшения наработки HF в темновой реакции при напуске газов в рабочий объем. Рассмотрены общие соотношения при инициировании цепной реакции химической накачки и различные способы инициирования, пригодные для лабораторных лазеров. Обобщен опыт эксплуатации оптических материалов в оптических системах импульсных HF лазеров, а также различных систем откачки отработанных газов и их дегазации. Рассмотрены различные области применения излучения химических лазеров в исследовательских и технических целях, а также их применение в селективных двухступенчатых фотодиссоциативных процессах совместно с эксимерными лазерами. Лит. — 83 назв., ил. — 5.

### III. СОЗДАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*С. В. Лукашенко, В. А. Мартиросов, Л. Н. Озеров*

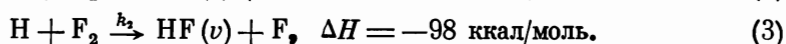
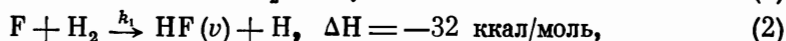
#### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ (ОБЗОР)

Идея построения химического лазера относится к 1961 г. [1]. В 1965 г. был получен первый опыт создания лабораторной модели прибора [2]. Дальнейшее развитие теории и практики химических лазеров связано с именами В. Л. Тальрозе [3] и А. Н. Ораевского. В работах этого периода В. Л. Тальрозе рассмотрел теорию химического лазера с учетом кинетики сложных химических реакций.

Экспериментальные и теоретические результаты работ периода 1961—1970 гг. достаточно полно рассмотрены в работах [4, 5], поэтому настоящий обзор посвящен в основном рассмотрению работ последующего периода, который характеризуется появлением экспериментальных и лабораторных образцов химических лазеров.

#### Принцип работы химических лазеров

В химических лазерах для создания инверсной населенности используется эффект неравновесного распределения химической энергии среди продуктов некоторых экзотермических реакций [3, 5]. Основой работы химических лазеров является химическая и физическая кинетика [5, 6], распределение химической энергии по степеням свободы продуктов реакции, релаксационные процессы и процессы энергообмена в реакционной системе. Как известно [7], существует ряд реакций, сопровождающихся вращательным, колебательным и электронным возбуждением, но лишь немногие из них могут использоваться для построения химических лазеров. При выборе процесса, приводящего к созданию достаточно мощного лазерного излучения, наиболее важными критериями являются определенные соотношения между скоростью заселения возбужденных уровней и скоростью релаксационных процессов при достаточно высоком энерго вкладе. Одной из реакций, обладающих этими свойствами, является цепная разветвленная реакция фтора с водородом [8]:



Так как  $k_2 < k_1$ , то скорость образования колебательно-возбужденных молекул  $HF(v)$  определяется реакцией (3). Энерговклад этого процесса достаточно велик.

Наиболее полное описание принципа работы импульсного химического лазера дается кинетической моделью [5, 7—11]. В этой модели

рассматриваются уравнения элементарных химических процессов иницирования, роста и обрыва цепи, ветвления, а также гибели активных центров. Система кинетических уравнений для этих процессов, дополненная системой релаксационных уравнений для процесса колебательно-колеба-

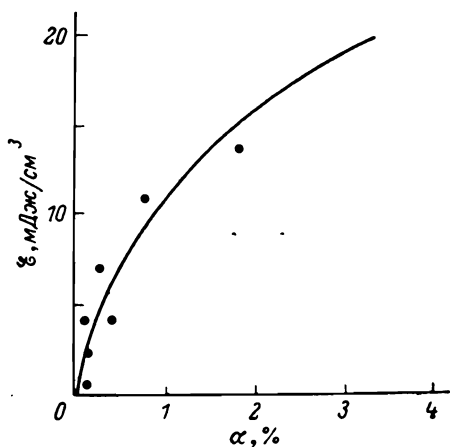


Рис. 1. Зависимость удельного энерго-  
съемы от степени диссоциации фтора.

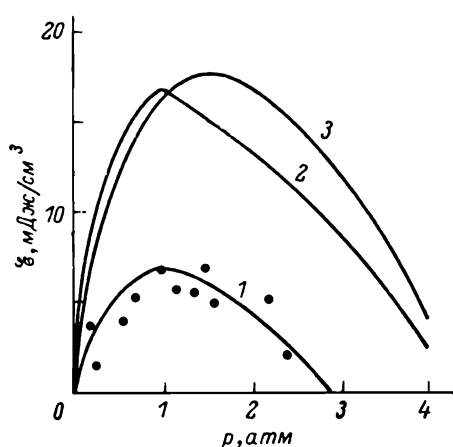


Рис. 2. Зависимость удельного энерго-  
съемы от полного давления смеси.

1 —  $\alpha=0.6$ ; 2 —  $\alpha=2.0$  при  $\omega^{-1}=5.5$  мкс;  
3 —  $\alpha=0.6$  при  $\omega^{-1}=1.0$  мкс.

тельного ( $V-V$ ) — обмена энергией для возбужденных молекул  $\text{HF}$  и  $\text{H}_2$  и колебательно-поступательного ( $V-T$ ) — релаксации этих молекул, а также уравнением теплового баланса, позволяет рассчитать основные величины и зависимости, характеризующие эффективность работы лазера.

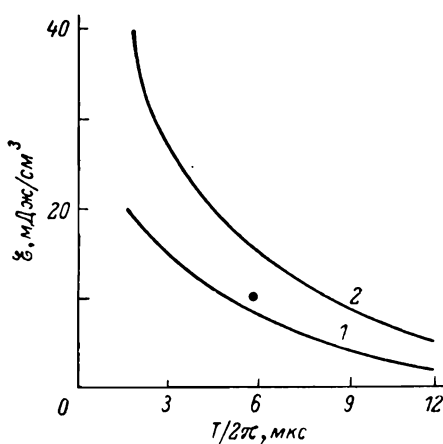


Рис. 3. Зависимость удельного энерго-  
съемы от времени иницирования.

1 —  $\alpha=0.6$ ; 2 —  $\alpha=2.0$  при  $\omega^{-1}=1.0$  мкс.

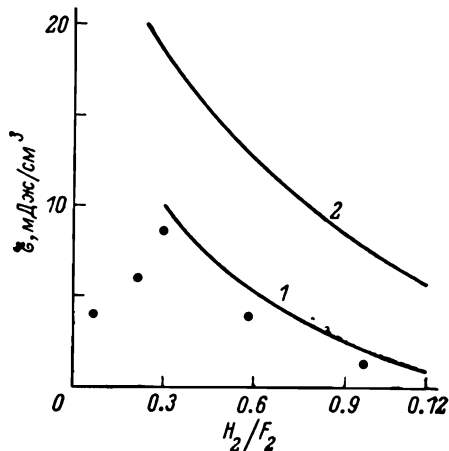


Рис. 4. Зависимость удельного энерго-  
съемы от состава смеси  $\text{H}_2 : \text{F}_2$ .

1 —  $\alpha=0.6$ ; 2 —  $\alpha=2.0$ .

Полная система уравнений для процесса  $\text{H}_2 + \text{F}_2$  содержит более 80 уравнений и соответственно предполагает знание такого же числа констант скоростей [11]. Для упрощения расчетов предлагаются модельные системы [8, 10]. В [8] рассматривается параметрическая модель импульсного химического лазера, в которой кинетика химической реакции описывается двухпараметрической схемой, а основные генерационные процессы рассматриваются в рамках двухуровневой модели. Эта модель позволяет рассчитать энергию генераций лазера  $\text{H}_2 - \text{F}_2$  в зависимости

от начальных условий (менялась степень диссоциации  $F_2$ , давление смеси, соотношение компонентов смеси). Результаты расчета и эксперимента из [8] приведены на рис. 1—4.

В [10, 12] дан теоретический анализ работы импульсного HF-лазера и подробно рассматриваются распределение продуктов реакции по энергиям и изменение концентраций исходных компонентов и продуктов реакции во время развития импульса генерации. Выделяются четыре стадии. На стадии 1 наблюдается полная инверсия молекул, т. е. осуществляется условие  $T_{v, v-1} < 0$  и происходят переходы 1—0, 2—1, 4—3, 5—4. На стадии 2 наблюдается частичная инверсия, т. е. выполняется условие  $(T_{v, v-1}/T_{вр}) > (h\nu_{v, v-1}/h\nu_{вр})$ . На этой стадии выгорает до 60% компонентов, и эта стадия дает основной вклад в процесс генерации, так как большая величина вращательного кванта HF обеспечивает сравнительно большое время жизни частичной инверсии. На стадии 3 происходит уменьшение колебательной температуры и увеличение вращательной, что приводит к нарушению условия частичной инверсии и срыву колебаний. На стадии 4 устанавливается термодинамическое равновесие,  $T_{v, v-1} = T_{вр} = T$ .

Впервые генерация на молекуле HF была получена в 1967 г. электрическим иницированием [13] и фотоиницированием [14], а на разветвленной цепной реакции — в 1969 г. [15].

### Схема и конструктивные элементы химического лазера

Блок-схема импульсного химического лазера (ИХЛ) представлена на рис. 5.

Конструктивно система напуска решается в зависимости от режима напуска. В [5, 8, 16—18] показано, что компоненты смеси могут подаваться в трех режимах: 1) заранее приготовленная смесь из специального

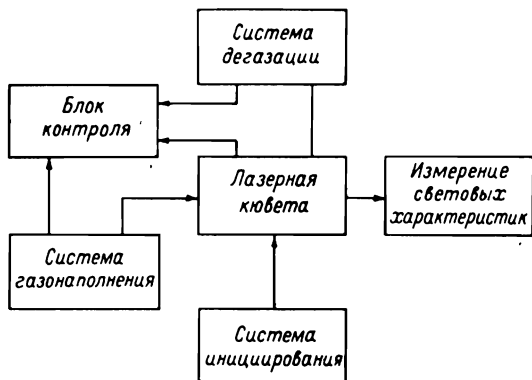


Рис. 5. Схема импульсного химического лазера.

охлаждаемого реактора подается в кювету [5]; 2) покомпонентный напуск в заранее отвакуумированную кювету, при этом первым подается газ-разбавитель [5], а фтор — последним и с малой скоростью [19]; последнее выполняется из-за возможности темновой реакции и самовозгорания; 3) заранее приготовленные компоненты ( $F_2 + He$ ) и ( $H_2 + He + O_2$ ) подаются в динамическом режиме, т. е. смешиваясь уже в трубопроводе [18]. Каждый из вышеуказанных режимов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Первый режим обеспечивает хорошее смешение, однако слишком велика вероятность наработки молекул HF. Второй режим обеспечивает минимальную наработку HF, однако смешение часто неоднородно, что вызывает оптические неоднородности при генерации. Третий режим

требует тщательного контроля за расходами компонентов [18], а также за развитием турбулентности. Для предотвращения темновой реакции к смеси ( $F_2 + H_2 + He$ ) добавляют газ-ингибитор —  $O_2$  [5, 18], а для увеличения скорости зарождения активных центров при малых давлениях [20] — фотолизирующие добавки типа  $MoF_6$ ,  $VF_5$  и т. п. Влияние компонентов смеси на удельный энергосъем исследовалось в [8] в пределах  $H_2 : F_2 : O_2 : He = (2-14) : (5.9-43.5) : (1.2-8.5) : (33.5-90.0)$  при давлении около 1 атм, а при повышенном давлении — в [17].

Все указанные способы напуска требуют тщательного контроля газового состава. Для этой цели может служить ИК-спектрометрия [21], газохроматографический анализ (например, хроматограф ХГ2302) [22], а также контроль за  $F_2$  с помощью метода, разработанного в [23].

Как показала работа [24], предварительное охлаждение компонентов не только снижает скорость релаксации молекул HF, но и заметно уменьшает время лазерного импульса.

Большое значение для оптимального составления смесей имеет предыстория кюветы, равно как и магистралей, а также выбор материалов. По опыту разработки хроматографа ХГ2302 наиболее приемлемы монель-металл, никель, приемлемы также нержавеющая сталь [25], алюминий, медь [5]. Все металлические части требуют тщательной и периодической пассивации [22]. Применение металлической кюветы затруднено вводом в нее линии высокого напряжения (габариты изолятора). Применение кварцевой кюветы [8, 26] осложнено тем, что ее стенки, вступая в реакцию с HF, матируются и тем самым снижается интенсивность фотоизолирующего света при внешнем расположении источников инициирования. Зато применение кварцевой кюветы понижает трудоемкость смены источника фотоизолирующего света и дает возможность применять внешние коаксиальные лампы, которые могут решить вопрос эффективного инициирования импульсного химического лазера. В основе этого процесса лежат следующие величины: энергия диссоциации молекулы  $F_2$  4.36 эВ при  $\lambda_{изл} = 284$  нм [17]; при давлении смеси 1 атм и наличии в ней  $\sim 43.5\%$  фтора необходимая степень диссоциации  $F_2$   $\alpha = 2\%$  [8, 10], т. е. энерговклад в единицу объема составляет  $\mathcal{E}_{вкл} = E_d \alpha [F_2] \approx 62.4$  мДж/см<sup>3</sup>, где  $\mathcal{E}_{вкл}$  — энерговклад;  $E_d$  — энергия диссоциации молекулы  $F_2$ .

Отметим, что пороговая генерация наблюдается при тех же условиях при  $\alpha = 0.15\%$ , т. е. при  $\mathcal{E}_{вкл} = 4.7$  мДж/см<sup>3</sup>.

Если учесть жесткие временные требования ко времени инициирования ( $\tau = 3-5$  мкс), которые определяются скоростью релаксации HF ( $\nu$ ) на HF, то сложность построения системы инициирования представляется очевидной.

Одно из главных преимуществ химического лазера — высокий к. п. д. по вложенной энергии при фото- и электроразрядном иницировании, который составляет 200—300%, что косвенно подтверждается данными по эффективной длине цепи [27].

Электроионизационная накачка, хотя и является рекордной по энергосъему и к. п. д. (800%) [28—33], не рассматривается ввиду неприменимости для лабораторной модели. Иницирование с помощью взрывающейся проволоки (фольги) также не представляет интереса в связи с однократностью действия. Кроме того, в зоне взрыва отчетливо проявляются оптические неоднородности [34].

В свою очередь фотоиницирование имеет ряд несомненных достоинств: возможность равномерного иницирования объема; возможность иницирования смеси при давлении  $\sim 1$  атм и выше.

К недостаткам можно в первую очередь отнести низкую эффективность вклада энергии в активную среду (по запасенной энергии в конденсаторах к. п. д. составляет 2—3%) [16, 35], а также возникающие оптические неоднородности [36]. Кроме того, требование максимума излучения в по-

лосу поглощения молекулярного фтора определяет требования к яркостной температуре источника света:  $T_s \approx (20-50) \cdot 10^3 \text{ K}$  [37].

В настоящее время наиболее перспективны в качестве источника УФ-излучения:

1) импульсные ксеноновые лампы различной конфигурации [37—41]; к числу их достоинств относится сравнительно высокая светоотдача разряда в Хе, к недостаткам — наличие стенок, существенные ограничения по плотности разрядного тока [42] и вводимой в лампу энергии;

2) свет различных стадий скользящего разряда [43] в самой активной среде:

а) подсветка с лидерной стадии скользящего разряда [43],

б) формирование импульса жесткого УФ-излучения в предразрядных стадиях скользящего разряда — ударная электромагнитная волна [44]; в этом случае основная сложность — в организации равномерного плазменного листа в атмосфере электроотрицательного газа активной среды [45].

Эффективность фотоиницирования определялась по специальной методике [17]. При этом проводились специальные работы по изучению влияния различных добавок (см. выше) с неперекрывающимися спектрами поглощения [5, 25], где показана их эффективность лишь при слабом уровне инициирования [20].

Низкая эффективность фотоиницирования, с одной стороны, и быстрый рост скорости релаксации HF ( $v$ ) при росте давления, с другой стороны, накладывают принципиальные ограничения на масштабы HF-системы.

Применение электроразрядного инициирования [27, 46] позволяет кардинальным образом повысить эффективность системы инициирования и обеспечить возникновение активных центров под действием 30—40% запасенной энергии (2—3% при фотоиницировании). Основная сложность при электроразрядном инициировании — организация вклада энергии именно в стадии объемного разряда. Быстрый переход такого разряда в искровую стадию по объему кюветы и контрагирование на электродах в среде такого газа, как фтор (время жизни свободного электрона при давлениях 100 мм рт. ст. составляет 1 мкс), ограничивает использование больших межэлектродных расстояний (более 1—3 см), высоких давлений рабочей смеси (более 200—300 мм рт. ст.). Кроме того, при возбуждении больших объемов возникают определенные трудности при организации равномерного объемного разряда по длине и ширине электродов [5].

Для стабилизации объемного разряда чаще всего применяется предварительную ионизацию смеси. Источник предварительной ионизации должен создать начальную концентрацию электронов  $n_0$ , обеспечивающую взаимное перекрытие всех электронных лавин  $n_0 \geq 10^{12} \text{ см}^{-3}$  [47], причем за время, меньшее времени формирования стримера из одиночной лавины,  $t_s = t/v_-$ , где  $t_s$  — длина промежутка;  $v_-$  — дрейфовая скорость электронов.

Источники предварительной ионизации на основе коронного разряда и УФ-излучения обеспечивают  $n_0 \approx 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

В связи с этим особенно перспективным может оказаться получение концентраций  $n_0 \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с помощью сильного предварительного разряда и последующего диффузионного расширения электронной компоненты из потока лидера. Имеются сведения о получении устойчивого объемного разряда в подобной системе на длине 5.2 см [48]. Стабилизации объемного разряда способствуют также применение высокорезисторных (германиевых, 50 Ом·см) электродов [49], применение барьерного разряда через диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью [50], сокращение длительности объемного разряда по сравнению с временем формирования дугового накала  $\sim 10^{-7} - 10^{-6} \text{ с}$  при давлении 100 мм рт. ст. [51, 52]. В настоящее время достигнуты следующие результаты. Уро-

вень вложенной энергии  $\sim 10 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup> при  $p \approx 250$  мм рт. ст. [53],  $250 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup> при  $p \approx 100$  мм рт. ст. [49] и  $500 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup> при  $p \approx 50$  мм рт. ст. [54]. Однако при увеличении удельного энергосъема при небольших диаметрах кюветы увеличивается лучевая нагрузка на зеркале. Спектральный состав излучения достаточно хорошо изучен в [55]. Там же рассмотрен вопрос распределения энергий по переходам и указано на влияние молекул HF стенок камеры и давления. При этом основной спектральный диапазон импульсного химического лазера на HF 2.7—3.2 мкм, поэтому на окна кюветы и зеркало резонатора накладываются специфические требования. Окна кюветы, как правило, выполняются из пластин сапфира, BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LiF, NaCl [5]. Эти материалы являются гигроскопичными и труднообрабатываемыми, и, кроме того, воздействие F<sub>2</sub> и HF и паров воды, которые присутствуют в воздухе, осложняет работу окон [56]. В [57] сделана попытка избавиться от окон даже с некоторой потерей по энергии. Резонатор состоит из двух зеркал с различными покрытиями, зависящими прежде всего от лучевой мощности. В целях обеспечения легкости юстировки глухое зеркало выполняется с  $R=3-10$  м при длине резонатора 1—2 м [5]. Отражающее покрытие выбирается из условий лучевой прочности: алюминий, бескислородная медь [58], Zn—Se, бериллиевая бронза, система TiCl—TiBr, молибден, медь, нержавеющей сталь, золото. Они либо наносятся напылением на кварц, либо выполняются зацело по специальной технологии. Второе зеркало выполняется аналогично с отверстием 0.5—3 мм или, при большем усилении, делается полупрозрачным многослойным на основе Ge, NaCl, Cd—Td с коэффициентом пропускания от 10 до 40% [58]. Для защиты зеркал часто применяются различные покрытия, например из CD<sub>2</sub>SNO<sub>4</sub> [59] или фторированного полимера этиленпропилена [60]. Наиболее часто применяются покрытия из серебра с пленкой ThF<sub>4</sub> (лучевая прочность до 150 Дж/см<sup>2</sup> [58]). В последние годы для изменения длины волны излучения, кроме изменения компонентов (H<sub>2</sub> на D<sub>2</sub>), применяются различные кристаллы, в основном LiNbO<sub>3</sub>, Ag<sub>3</sub>AsS<sub>3</sub> [61, 62].

В комплект импульсного химического лазера, кроме перечисленных устройств и систем, входит система откачки отработанных газов и их дегазации. Для дегазации продуктов генерации используются охлаждаемая азотом ловушка и капсула с активированным углем [5]. Они дают возможность снизить концентрацию фтора до уровня предельно допустимой: [F<sub>2</sub>] —  $2 \cdot 10^{-4}$  мг/л. В то же время существуют системы, исключающие механический насос [63, 64], правда, рассчитанные на небольшое число срабатываний.

Многие из вышеперечисленных устройств нашли свое применение в серийно выпускаемых за рубежом лазерах. Еще в 1975 г. канадская фирма «Lumonix» разработала электроразрядный лазер на HF/DF типа TEA [58]. Вслед за этой фирмой некоторые другие фирмы также стали производить химические лазеры с электроразрядным иницированием.

### Области применения химических лазеров

Импульсные химические лазеры могут найти применение при селективном фотохимическом воздействии лазерного излучения [4], при детектировании промышленных загрязнений [65], при детектировании малых количеств веществ, например в хроматографии, и т. д. Применение импульсного химического лазера даст возможность осуществить селективные химические реакции [66—68]. Воздействие лазерного излучения в отличие от воздействия обычных источников света позволяет осуществить возбуждение практически любых квантовых состояний атомов и молекул с энергией возбуждения в диапазоне 0.1—10 эВ [68]. Наряду с осуществлением селективных химических реакций мощное лазерное излучение дает

возможность детально исследовать механизм элементарных газофазных реакций [69]. Селективное воздействие лазерного излучения возможно благодаря высокой монохроматичности, пространственной и временной когерентности и большой спектральной интенсивности излучения. Таким образом, лазерные кванты определенной энергии могут возбуждать определенные виды атомов в смеси, активизировать определенные связи в молекулах, поглощаясь, приводить к ионизации и диссоциации определенных атомов и молекул. Области применения процессов лазерной фотохимии представлены в работе [68].

В настоящее время различают три вида селективного воздействия лазерного излучения с веществом [66]: селективная фотоионизация атомов, многоступенчатая селективная диссоциация (преддиссоциация) молекул ИК-лазерным полем высокой интенсивности и селективные гетерогенные процессы.

Наиболее изученным и уже нашедшим широкое применение процессом селективного воздействия лазерного излучения с веществом является процесс ступенчатой селективной фотоионизации. В основе этого процесса [66] лежит способность мощного лазерного излучения при резонансном поглощении существенно менять соотношение между населенностями уровней, связанных резонансным переходом. Первые эксперименты по двухступенчатой ионизации атомов были проведены при разделении изотопов рубидия [70], в дальнейшем этим методом успешно осуществлено разделение изотопов урана [71], лития [72] и т. д. Общей чертой всех схем ступенчатой селективности фотоионизации является последовательность процессов селективного возбуждения и ионизации возбужденных атомов. Этот же метод селективной ступенчатой ионизации с успехом применяется в спектроскопии сверхвысокого разрешения для изучения сверхтонкой структуры или изотопической структуры спектров атомов [67].

Метод многофотонной диссоциации молекул использует только интенсивное ИК-излучение для прямого возбуждения высоких колебательных уровней в основном электронном состоянии, в то время как для осуществления предыдущего метода необходимо использование ультрафиолетового или видимого излучения для возбуждения электронных состояний [67, 68]. Существование эффекта состоит в том, что, когда частота мощного ИК-лазера (интенсивность  $10^7$ — $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) настроена на колебательную полосу молекулы, изотопический сдвиг которой сравним или больше ширины Q-ветви колебательной полосы, происходит необратимая диссоциация облучаемых молекул [68]. Этот метод представляется сегодня наиболее перспективным для разделения изотопов тяжелых элементов, но в то же время в [68] отмечается, что для создания промышленной установки метод должен обладать по крайней мере двумя чертами:

- 1) обеспечение уровня средней мощности 1 кВт—1 МВт;
- 2) простота и экономичность лазерной техники.

Активно разрабатывается метод селективной двухступенчатой (ИК+УФ) фотодиссоциации [73]. Этот процесс осуществим, если возбуждение молекулы сдвигает полосу фотопоглощения, которое вызывает фотодиссоциацию молекулы (ИК-излучения). Тогда УФ-излучение, частота которого выбрана в области спектра, может осуществить фотодиссоциацию молекул.

Для получения селективного излучения в УФ-области могут служить лазеры, работающие на переходах между термами молекул, нижний из которых является отталкивательным, а верхний имеет потенциальный минимум [74]. Такие молекулы, существующие только в возбужденном состоянии, называются эксимерными. К данному типу молекул относятся прежде всего молекулы галогенидов инертных газов, а также молекулы инертных газов. Впервые лазер на Хе<sub>2</sub> описан в 1970 г. [75]. В дальнейшем



выходная энергия лазера на галогенидах инертных газов была повышена до 100 Дж.

Эксимерные лазеры характеризуются коротковолновой областью излучения  $\lambda=170-560$  нм [76], а также широкой линией усиления, что открывает возможности применения их в нелинейной оптике, фотохимии, биологии, а также в качестве источника накачки лазеров на красителях [77]. В то же время малая длина волны и широкая линия переходов требуют высоких плотностей энергии накачки. В [78] показано, что для эксимерного лазера с  $\lambda=(2-3)\cdot 10^{-5}$  см и пороговым значением коэффициента усиления  $k \approx 10^{-2}$  см<sup>-1</sup> пороговое значение плотности возбужденных молекул  $N=10^{14}-10^{15}$  см<sup>-3</sup> и для создания такой плотности необходима плотность энергии накачки  $\mathcal{E}_n=10^{-2}$  Дж/см<sup>3</sup> за время  $10^{-8}-10^{-7}$  с. В настоящее время такие значения  $\mathcal{E}_n$  могут быть созданы пучком быстрых электронов или мощным импульсным электрическим разрядом [79, 80]. Последнее в условиях лаборатории наиболее предпочтительно; кроме того, в условиях сочетания ИК-излучения HF-лазера и УФ-излучения эксимерного лазера некоторые узлы и блоки (блок подачи реагентов и т. п.) могут быть выполнены совместно.

В [81] сообщается о генерации молекулы XeF при фотодиссоциации молекулы XeF<sub>2</sub>, вызванной сильноточным разрядом в смеси XeF<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : Ar=0.004 : 0.07 : 0.93 атм. Впервые же оптическая накачка для благородных газов была предложена в [82]. В таблицах [76, 79, 83] даны соотношения между выходной мощностью, составом активного тела, давлением, типом накачки. В настоящее время предпринимаются попытки создания лазеров вакуумного ультрафиолета на галогенидах благородных газов [76] с использованием в качестве накачки разряда бегущей волны. Получена генерация на молекулах AgCl, AgF, KBr, KrCl, KrF в области 170—250 нм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Polani J. C., J. Chem. Phys., 1961, v. 34, p. 347.
2. Kasper J. V. V., Pimentel G. C., Phys. Rev. Lett., 1965, v. 14, p. 352.
3. Тальрозе В. Л., Кинетика и катализ, 1964, т. 5. № 1, с. 11.
4. Дунская И. М. Лазеры и химия. М., 1979.
5. Башкин А. С., Гошин В. И., Никитин А. И., Ораевский А. Н., Химические лазеры. М., 1975 (Радиотехника, т. 8 (Итоги науки и техники)).
6. Ораевский А. Н., ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 177.
7. Каррингтон Т., Гарвин Д., в кн.: Возбужденные частицы в химической кинетике. М., 1973, с. 123.
8. Агроскин В. Я., Васильев Г. К., Кирьянов В. И., Тальрозе В. Л., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 9, с. 1932.
9. Васильев Г. К., Вижин В. В., Макаров Е. Ф., Чернышев Ю. А., Тальрозе В. Л., Химия высоких энергий, 1975, т. 9, № 2, с. 154.
10. Игошин В. И., Тр. ФИАН, 1974, № 76, с. 117.
11. Suchard S. N., Kerber R. L., Emanuel G., Whittier J. S., J. Chem. Phys., 1972, v. 57, p. 5065.
12. Игошин В. И., Никитин В. Ю., Ораевский А. Н., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 6, с. 1282.
13. Deutsch T. F., Appl. Phys. Lett., 1967, v. 10, p. 234.
14. Котра К. Л., Pimentel G. C., J. Chem. Phys., 1967, v. 47, p. 857.
15. Батовский О. М., Васильев Г. К., Макаров Е. Ф., Тальрозе В. Л., Письма в ЖЭТФ, 1969, т. 9, № 6, с. 341.
16. Батовский О. М., Гурьев В. И., Квантовая электроника, 1974, т. 3, № 4, с. 1446.
17. Колчин Ю. А., Колотовский В. Б., Пшежецкий С. Я., Чеботарев Н. Ф., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 12, с. 2642.
18. Басов Н. Г., Башкин А. С., Григорьев П. Г., Ораевский А. Н., Породинков О. Е., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 9, с. 2067.
19. Патент Франции № 2298205 от 17.09.76. Портативный химический лазер и способ обращения с ним.
20. Ковлов Ю. П., Петров Н. Х., Пшежецкий С. Я., Чеботарев Н. Ф., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 12, с. 2645.
21. Hess L. D., Appl. Phys. Lett., 1971, v. 19, p. 1.
22. Леонидов В. О., Медведев В. А. Фторная калориметрия. М., 1978.

23. Suchard S. N., Gross R. W. F., Whitter J. S., Appl. Phys. Lett., 1971, v. 19, p. 411.
24. Башкин А. С., Игошин В. И., Никитин В. Ю., Ораевский А. Н., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 4, с. 907.
25. Басов Н. Г., Заворотный С. Н., Маркин Е. П., Никитин А. И., Ораевский А. Н., Борович А. Б., Григорьев П. Г., Зуев В. С., Квантовая электроника, 1974, т. 3, № 3, с. 560.
26. Агроскин В. Я., Васильев Г. К., Кирьянов В. И., Тальрозе В. Л., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 11, с. 2436.
27. Патент США № 3893045 от 1.07.75. Импульсный химический лазер.
28. VIII конференция по квантовой электронике и нелинейной оптике ЭКОН-78. — Квантовая электроника, 1979, т. 6, № 3, с. 654.
29. Басов Н. Г., Башкин А. С., Голубев П. Е., Козлов И. П., Ораевский А. Н., Пискунов А. К., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 4, с. 910.
30. Пономаренко А. Г., Солоухин Р. И., Ханов Ю. К., Томашев В. Н., Троцагин В. Н., Юраев Н. Н., в кн.: Газовые лазеры. Новосибирск, 1977, с. 105.
31. Gerberg R. A., Patterson E. L., Appl. Phys. Lett., 1974, v. 25, p. 281.
32. Баранов В. К., Демиденко Ю. Н., Зеленский К. Ф., Кормер С. Б., Пегоев И. Н., Трошкин И. А., Цукерман В. А., Щетинский Е. Н., Юшко К. Б., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 2, с. 415.
33. Башкин А. С., Коношенко А. Ф., Ораевский А. Н., Томашев В. Н., Хотышев Н. Н., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 7, с. 1608.
34. Белоцерковец А. В., Зыков Л. И., Кириллов Г. А., Кормер С. Б., Куратов Ю. В., Савин Ю. В., Сузарев С. А., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 5, с. 1102.
35. Кулаков П. В., Никитин А. И., Ораевский А. Н., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 6, с. 1677.
36. Зыков Л. И., Кормер С. Б., Савин Ю. В., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 6, с. 1336.
37. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. М., 1976.
38. Маршак И. С. Импульсные источники света. М., 1978.
39. Волюков В. М., Тарасов С. А. Полостная ксеноновая лампа-вспышка с яркостной температурой 50 000° К в УФ части спектра. Препринт ФИАН, № 3. М., 1974.
40. Балтиков Ф. Н., Багрихин Б. А., Квантовая электроника, 1975, т. 2, № 4, с. 822.
41. Желобов Е. Ф., Зенков Д. И., Павловский А. И., Романенко Н. В., Сузанов П. В., Тихонов А. И., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 122.
42. Кирсанов В. П., Трошкин С. В., Быков И. В., Квантовая электроника, 1975, т. 2, № 1, с. 181.
43. Башкин А. С., Григорьев П. Г., Ораевский А. Н., Скворцов А. Б., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 8, с. 1824.
44. Красюк И. К., Липатов Н. И., Пашинин О. П., Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 11, с. 2384.
45. Глотова П. Ф., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Устойчивость разряда переменного тока в присутствии электроотрицательных газов. М., 1978 (№ 3557-78 деп.).
46. Заявка Франции № 2139189 от 9.02.73. Мощный химический лазер.
47. Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Солоухин Р. И., в кн.: Газовые лазеры. Новосибирск, 1977, с. 298.
48. Slade D. P., Serafetinides A., IEEE J. Quant. Electron., 1978, v. 14, p. 321.
49. Alan F., Hall Tom A., Hatch Christopher B., IEEE J. Quant. Electron., 1977, v. 13, p. 801.
50. Ищенко В. Н., Лисицын В. Н., Сорокин А. Р., Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 4, с. 788—994.
51. Hidson P. I., Makios V., Morrison R., Phys. Lett., 1972, v. 40, p. 413.
52. Иванченко А. И., Солоухин Р. И., Фидельман Г. Н., Якоби Ю. А., в кн.: Газовые лазеры. Новосибирск, 1977, с. 112.
53. Brandelik I. E., Paulson R. F., IEEE J. Quant. Electron., 1977, v. 13, p. 933.
54. Arnold G. P., Wensel R. C., IEEE J. Quant. Electron., 1973, v. 9, p. 491.
55. Баратовский О. М., Гурьев В. И., Квантовая электроника, 1974, т. 3, № 3, с. 572.
56. Ковалев В. И., Файзуллоев Ф. С., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 3, с. 587.
57. Агроскина В. Я. Сравнительное исследование энергетических характеристик импульсных химических HF и DF—CO<sub>2</sub> лазеров. Автореф. канд. дис. М., 1980.
58. Материалы выставки «Физика-75». — Квантовая электроника, 1976, т. 3, № 8, с. 1837.
59. Патент США № 3815036 от 4.06.74. Химический лазер.
60. Заявка США № B527669 от 13.01.76. Мощный химический лазер.
61. Никогосян Д. Н., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 5.
62. Клементьев В. М., Колпаков Ю. Г., Печерский Ю. А., Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 7, с. 1467.
63. Заявка Великобритании № 1461710 от 19.01.77. Откачка химического лазера.
64. Заявка Франции № 2298201 от 17.08.76. Насос для химического лазера и режим работы лазера с данным насосом.
65. Лазерная спектроскопия атомов и молекул. Под ред. Г. Вальтера. М., 1979.
66. Карлов Н. В., УФН, 1979, т. 127, № 4, с. 593.

67. *Тальрозе В. Л.*, в кн.: Газодинамические лазеры и лазерная фотохимия. М., 1978, с. 105.
68. *Летохов В. С.*, УФН, 1978, т. 125, № 1, с. 57.
69. *Молин Ю. Н.*, в кн.: Газодинамические лазеры и лазерная фотохимия. М., 1978, с. 94.
70. *Амбарцумян Р. В., Калинин В. П., Летохов В. С.*, Письма в ЖЭТФ, 1971, т. 13, № 6, с. 305.
71. *Jones G. S., Itzkan I., Pike C. T., Levy R. H., Levin L.*, QE, 1975, v. 11, p. 101D.
72. *Карлов Н. В., Крынецкий Б. Б., Стельмах О. М.*, Квантовая электроника, 1977, т. 4., № 10, с. 2275.
73. *Gross R. W.*, Opt. Engineer, 1974, v. 13, p. 506.
74. Справочник по лазерам. Т. 1. М., 1978.
75. *Басов Н. Г.*, Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 12, № 10, с. 473.
76. *Вэйнант Р.*, Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 8, с. 1767.
77. *Лисицын В. Н., Рансев А. М., Черненко А. А.*, Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 8, с. 1162.
78. *Елецкий А. В.*, УФН, 1978, т. 125, № 2, с. 279.
79. *Ванг Ч. П.*, Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 8, с. 1771.
80. *Скотт, Си*, Приборы для научных исследований, 1978, № 6, с. 89.
81. *Басов Н. Г.*, Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 11, с. 2453.
82. *Борович Б. Л., Зуев В. С.*, ЖЭТФ, 1970, т. 58, с. 1794.
83. *Бычков Ю. И., Костин М. Н.*, Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 5, с. 1164