

А. Г. ПОНОМАРЕНКО, член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН,  
Ю. И. ХАПОВ

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХИМИЧЕСКОГО HF-ЛАЗЕРА, ИНИЦИИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

После создания химического лазера <sup>(1)</sup> наметилось несколько направлений разработки эффективных систем, использующих химическую энергию для накачки активной среды. Наиболее перспективными представляются HF-лазеры <sup>(2-6)</sup>, которые обычно работают по следующей схеме. В лазерной камере имеется смесь, состоящая из молекул водорода и фтора или их доноров (например, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, SF<sub>6</sub>). Путем фотолиза или электронным ударом от донора фтора отщепляется атомарный фтор, вступающий в химическую реакцию с водородом или водородсодержащей молекулой, образуя колебательно возбужденную молекулу HF.

Наибольшей эффективностью обладает лазер, работающий на смеси H<sub>2</sub>+F<sub>2</sub> с электрическим возбуждением, где получен электрический к.п.д. более 100% <sup>(7)</sup>. Эффективность систем с применением фторидов меньше из-за того, что для образования атомарного фтора требуется значительно большая энергия (3,4 эв для SF<sub>6</sub> при энергии диссоциации фтора 1,6 эв). Тем не менее использование фторидов вполне оправдано рядом преимуществ в практическом отношении. Кроме того, для выяснения таких вопросов, как влияние дезактивации возбужденных молекул HF водородсодержащими молекулами, продуктами реакции, а также невозбужденными молекулами HF на к.п.д. и коэффициент усиления лазера, также удобно применять химически менее активный газ, например, SF<sub>6</sub>. Вероятности процессов дезактивации HF(*v*), где *v* ≤ 3, невозбужденными молекулами HF и H<sub>2</sub> близки <sup>(8, 9)</sup>, однако, поскольку в лазерной камере H<sub>2</sub> значительно больше, чем других продуктов, скорость столкновительной дезактивации будет в основном определяться парциальным содержанием водорода. Изучение влияния столкновительной дезактивации на энергетические характеристики системы представляется очень важным, так как только в этом случае можно надежно выбирать оптимальные условия работы лазера, в частности давление и состав рабочей смеси. Поиск оптимальных режимов работы системы с этой точки зрения и представляет собой основную цель описываемых ниже экспериментов.

В данной работе использовалась смесь H<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub>, относительную концентрацию компонентов смеси изменяли от 1 : 30 до 1 : 2. Исследования проводили в диапазоне давлений от 0,1 до 2 атм. Химическая реакция инициировалась направленным перпендикулярно оптической оси резонатора пучком электронов <sup>(10)</sup>, что позволяло работать при большом давлении активной среды и большой удельной вкладываемой энергии (~5·10<sup>-2</sup> Дж/см<sup>3</sup> в оптимальном режиме). Пучок электронов создавали с помощью ускорителя, описанного в работе <sup>(11)</sup>, при следующих параметрах пучка: максимальная энергия электронов 100—120 кэВ; максимальная амплитуда импульса тока 3,5—4,3 кА, форма импульса близка к трапецеидальной, с передним и задним фронтом порядка 6 псек. и длительностью на полувисоте около 15 псек; полная энергия пучка составляла 4—6 Дж. Оптический резонатор состоял из сферического зеркала, напыленного золотом и пластины из ВаF<sub>2</sub>, служившей выходным окном; диаметр зеркала 3 см, радиус кривиз-

ны 3 м; длина активной среды 20 см, высота 2,5 см, максимальный активный объем, из которого выводилось излучение, составлял около 120 см<sup>3</sup>.

Электроны пучка рассеиваются на большие углы: из фотографии свечения SF<sub>6</sub> в поперечном сечении можно было определить, что форма поперечного сечения объема, занимаемого пучком, близка к полуокружности.

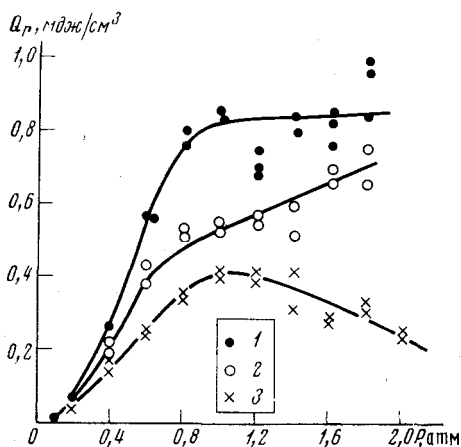


Рис. 1. Зависимость удельной энергии излучения  $Q_p$  от давления  $P$  активной среды при различных соотношениях компонентов  $H_2:SF_6$ : 1 — 1:8; 2 — 1:23; 3 — 1:2. Энергия электронов 100 кэВ, полная энергия пучка 4 Дж

Эксперимент проводился при давлениях SF<sub>6</sub>, равных 0,6; 0,8; 1,0 атм. Полученная величина длины пробега электронов практически совпадала с вычисленной по формуле, приведенной в работе (12),  $R=4,57 \cdot 10^{-3} U^{1,75}/\rho$ , где  $\rho$  — плотность газа, мг/см<sup>3</sup>,  $U$  — энергия электронов, кэВ,  $R$  — длина пробега, см. С увеличением давления длина пробега электронов уменьшается, что приводит к увеличению удельного вклада энергии в области инжекции пучка. Кроме того следует учитывать, что при высоких давлениях длина пробега электронов становится меньше высоты зеркала резонатора (в нашем случае 2,5 см), поэтому высота активной среды, а следовательно, и активный объем уменьшаются.

Экспериментально было установлено, что общий вид зависимостей полной энергии излучения от давления сохраняется подобным в широком диапазоне соотношений  $H_2:SF_6$ . С увеличением давления полная энергия излучения возрастает, достигает максимальной величины при некотором оптимальном давлении, а затем падает, причем величина оптимального давления зависит от парциального состава смеси. Именно такая зависимость наблюдалась в работе (10), однако приведенное там соображение, что максимум энергии излучения достигается при таком давлении, когда инжектируемые электроны имеют длину пробега, равную высоте резонатора, на наш взгляд, требует уточнения.

Мы сопоставили (табл. 1) давление  $P_0$ , при котором длина пробега электронов равна высоте резонатора ( $R=2,5$  см), с давлением  $P_r$ , при котором наблюдалась максимальная энергия излучения. Видно, что эти величины заметно различаются, особенно при больших относительных концентрациях водорода.

Как уже отмечалось, при увеличении давления непрерывно увеличивается удельный вклад энергии пучка. Полная же вкладываемая энергия ведет себя несколько иначе: при давлениях, меньших  $P_0$ , она пропорциональна удельной энергии (активный объем остается постоянным), а при давлениях, больших  $P_0$ , величина полной вкладываемой энергии фактически не изменяется и равна в нашей геометрии примерно 0,7 от энергии инжектируемого пучка. Поэтому наиболее показательной является зависимость от давления не полной, а удельной энергии излучения  $Q_p$  (т. е. отношения полной энергии импульса лазерного излучения к эффективному «возбужденному» объему резонатора), фактически исключаяющей побочную роль геометрических факторов. Серия таких зависимостей при различных концентрациях компонентов приведена на рис. 1. Видно, что при большем парциальном содержании водорода ( $H_2:SF_6=1:2$ ) величина  $Q_p$  возрастает, достигает максимального значения, а затем, несмотря на увеличение удельной вкладываемой энергии, начинает падать. При отношении 1:8 эта величина возрастает, а затем остается постоянной. При малом содержании водорода (1:23)  $Q_p$  непрерывно возрастает: при малых давлениях

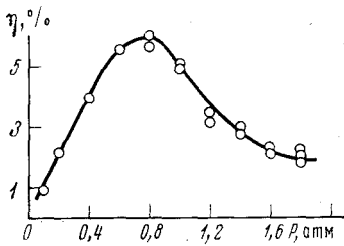


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость к.п.д.  $\eta$  от давления  $P$  активной среды.  $H_2 : SF_6 = 1 : 8$ ; энергия электронов 100 кэВ, полная энергия пучка 4 дж

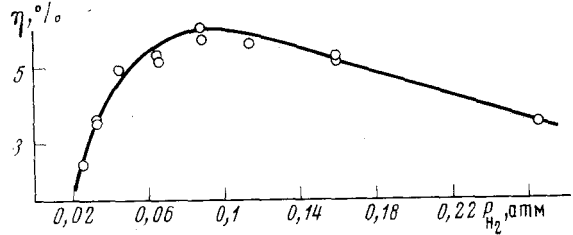


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость к.п.д.  $\eta$  от парциального давления водорода  $P_{H_2}$ . Общее давление активной среды 0,8 атм.; энергия электронов 100 кэВ, полная энергия пучка 4 дж

быстро, а затем более плавно. Такое поведение указанных зависимостей и увеличивающееся смещение положения максимума энергии излучения в сторону меньших давлений при больших парциальных содержаниях водорода, экспериментально подтверждаются высказанное выше предположение о существенной роли молекул водорода в столкновительной дезактивации возбужденных молекул HF.

Увеличение скорости столкновительной дезактивации с ростом концентрации водорода в лазерной камере отражается также и на поведении к.п.д. лазера. Зависимость электрического к.п.д. от давления активной среды для соотношения  $H_2 : SF_6 = 1 : 8$  представлена на рис. 2 (аналогичные зависимости при других соотношениях компонент оказались подобными). Давление, соответствующее максимальному к.п.д., равно 0,8 атм., т. е. несколько меньше, чем давление, соответствующее максимуму излучаемой энергии. Величина этого давления в нашей геометрии почти не зависит от состава газа. Зависимость к.п.д. от парциального давления водорода при общем

Таблица 1

$H_2 : SF_6$	$P_э$ , атм.	$P_r$ , атм.
1 : 2	1,47	1,1
1 : 4	1,25	1,05
1 : 8	1,1	0,98
1 : 23	1,03	0,93

Таблица 2

$H_2 : SF_6$	$P$ , атм.	$k$ , %·см <sup>-1</sup>
1 : 8	0,8	5,8
1 : 8	1,1	8,5
1 : 8	1,4	11,6
1 : 10	1,0	6,2

давлению смеси 0,8 атм. представлена на рис. 3. Видно, что при увеличении концентрации водорода к.п.д. лазера увеличивается до 6% ( $H_2 : SF_6 = 1 : 8$ ), а затем падает.

Существенной особенностью описываемого химического HF-лазера является большой коэффициент усиления: генерация осуществляется с одним зеркалом и при относительно небольшой длине активной среды. В серии экспериментов изменялась длина активной среды при сохранении удельной вкладываемой энергии. Если принять коэффициент отражения зеркала равным 100%, интенсивность выходящего светового пучка можно представить как  $I = I_0 \exp(2kL)$ ,  $k$  — показатель усиления. Поскольку продолжительность лазерного импульса почти не зависит от длины активной среды, полная энергия будет пропорциональна интенсивности, т. е.  $\lg Q/Q_0 \sim kL$ . Форма зависимости  $\lg Q/Q_0$  от длины активной среды представлена на рис. 4 для  $H_2 : SF_6 = 1 : 8$  при трех различных давлениях. Начиная с некоторой длины (различной для различных смесей), зависимость выходной энергии от длины близка к экспоненциальной (прямойные

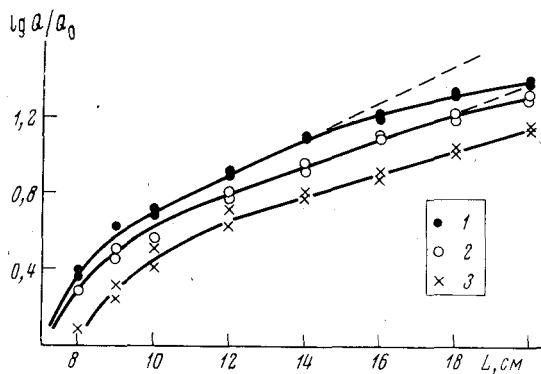


Рис. 4. Форма зависимости полной энергии излучения  $Q$  от длины  $L$  активной среды при различных давлениях смеси (атм): 1 — 1,4; 2 — 1,1; 3 — 0,8 атм.  $\text{H}_2 : \text{SF}_6 = 1 : 8$ , энергия электронов 120 кэВ, полная энергия пучка около 6 дж, максимальная энергия излучения около 0,2 дж

порядка атмосферного и более, нельзя пренебрегать столкновительной дезактивацией возбужденных молекул  $\text{HF}$  молекулярным водородом, поскольку это приводит к уменьшению коэффициента усиления и, соответственно, к.п.д. лазера. Большой коэффициент усиления системы позволяет работать с одним зеркалом, что является большим преимуществом лазера такого типа. При выбранной геометрии резонатора и энергии электронов давление, соответствующее оптимальному режиму, составляет около 0,8 атм. Длина пробега инжектируемых электронов должна быть примерно равна поперечному размеру активной среды, поскольку в этом случае в газ вкладывается максимальная энергия пучка. Оптимальное соотношение компонентов смеси находится между 1 : 15 и 1 : 7.

Наконец, отметим еще одну особенность работы лазера. При многократном повторении процесса без смены смеси нельзя пренебрегать эффектами дезактивации остаточными продуктами реакции, в первую очередь, накапливающимися невозбужденными молекулами  $\text{HF}$ . Подробного анализа этих эффектов в работе не проводилось, однако было замечено, что энергия излучения падала примерно в 1,5 раза после 10—15 повторений. Следовательно, учет этого явления необходим в лазерах, работающих в режиме с большой частотой повторения.

Институт теоретической и прикладной механики  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Новосибирск

Поступило  
21 X 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. V. V. Kasper, G. C. Pimentel, Phys. Rev. Lett., v. 14, 10, 352 (1965). <sup>2</sup> Н. Г. Басов, Л. В. Кулаков и др., Письма ЖЭТФ, т. 9, 613 (1969). <sup>3</sup> Г. Г. Долгов-Савельев, А. А. Подмиогин, Квантовая электроника, № 4, 69 (1972). <sup>4</sup> В. Н. Баграшвили, И. Н. Князев и др., Письма ЖЭТФ, т. 18, 110 (1973). <sup>5</sup> J. V. Parker, R. R. Stephens, Appl. Letters, v. 22, 450 (1973). <sup>6</sup> C. P. Robinson, R. J. Jensen, A. Kolb, IEEE J. Quant. Electr., QE-9, 9 (1973). <sup>7</sup> R. L. Kerber, A. Ching et al., IEEE J. Quant. Electr., QE-9, 6 (1973). <sup>8</sup> J. K. Hancock, W. H. Green, J. Chem. Phys., v. 57, 11, 4515 (1972). <sup>9</sup> S. N. Suchard, R. L. Kerber et al., J. Chem. Phys., v. 57, 12, 5065 (1972). <sup>10</sup> R. W. F. Gross, F. Wesner, Appl. Phys. Lett., v. 23, 10, 559 (1973). <sup>11</sup> Ю. В. Афонин, А. Г. Пономаренко и др., Приборы и техн. экп., № 5, 20 (1973). <sup>12</sup> A. E. Grün, Zs. Naturforsch., B. 12a, 2, 89 (1957).