

А. С. Башкин, В. А. Золотарев, В. Н. Томашов, М. П. Фролов

О ВЛИЯНИИ МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ НА ЭНЕРГИЮ ГЕНЕРАЦИИ ФОТОИНИЦИИРУЕМОГО H_2-F_2 -ЛАЗЕРА

Исследовано влияние добавок многоатомных газов на энергетику H_2-F_2 -лазера при контролируемом начальном иницировании. Полученные результаты свидетельствуют о наличии двух механизмов повышения энергии генерации H_2-F_2 -лазера. Первый механизм является общим для всех газов и связан с изменением теплоемкости. Вторым механизмом присущ лишь отдельным газам и связан с ускорением установления вращательного равновесия молекул HF. Степень влияния многоатомных газов сильно зависит от начальных условий эксперимента.

Обычно рабочая смесь импульсного H_2-F_2 -лазера наряду с водородом и фтором содержит ряд дополнительных компонентов, которые, как известно, благоприятно сказываются на ее стабильности [1].

Кроме того, в [2—4] сообщалось о положительном влиянии небольших добавок многоатомных газов на энергетику H_2-F_2 -лазера. Так, например, в [2] было получено увеличение энергии генерации в 1,8 раза при использовании в качестве разбавителя C_5F_{12} . В [3, 4] сообщалось о двукратном увеличении энергии генерации химического лазера при добавлении в рабочую смесь молекул SF_6 . В литературе нет однозначного объяснения указанного эффекта. Роль многоатомных газов может быть двоякой. С одной стороны, они ускоряют процесс установления вращательного равновесия молекул HF [2, 5], тем самым способствуя увеличению энергетики H_2-F_2 -лазера [6, 7], а с другой стороны повышают теплоемкость рабочей смеси, снижая подъем температуры в ходе цепной реакции, что также может способствовать росту энергии генерации [3, 4]. К сожалению, в [2, 3] отсутствуют данные об уровне начального иницирования, что затрудняет интерпретацию и сопоставление результатов, полученных в различных экспериментальных условиях.

В настоящей работе исследовано влияние многоатомных газов SF_6 , CF_4 , C_5F_{12} на энергетические и временные характеристики H_2-F_2 -лазера в широком диапазоне начальных условий при контролируемых степенях диссоциации фтора, что позволяет сделать более определенные выводы о степени и механизме влияния многоатомных газов на энергетику химического лазера (ХЛ).

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [8]. Иницирование H_2-F_2 -лазера осуществлялось третьей гармоникой неодимового лазера с длительностью импульса 10 нс. Пучок УФ излучения вводился в кювету ХЛ под небольшим углом к оптической оси. Кювета имела длину 18 см, резонатор HF-лазера был образован золотым зеркалом и плоскопараллельной пластинкой, изготовленной из сапфира. Рабочая смесь готовилась непосредственно в кювете при покомпонентном напуске газов, осуществлявшемся в следующем порядке: F_2 , O_2 , M, He, H_2 , He, где M— SF_6 , CF_4 , C_5F_{12} . После напуска многоатомного газа для улучшения условий перемешивания в кювету добавлялось 10—50 мм рт. ст. He (в зависимости от давления M), что практически не сказывалось на суммарной теплоемкости смеси. Напуск второй порции He (после напуска H_2) осуществлялся лишь в тех случаях, когда было необходимо приготовить смеси, содержащие более 650 мм рт. ст. He. В настоящей работе в отличие от [8] для регистрации формы импульса генерации HF-лазера использовался пироэлектрический приемник, сигнал с которого поступал на вход осциллографа С8-12. Временное разрешение схемы регистрации составляло ~10 нс.

На рис. 1 представлены зависимости энергосъема ϵ_T с единицы объема ХЛ от начальной концентрации атомарного фтора $[F]_0$, полученные для

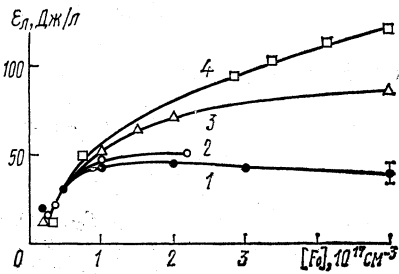


Рис. 1. Зависимость удельного энергосъема ХЛ от начальной концентрации атомарного фтора для смесей $F_2 : H_2 : O_2 : He : SF_6 = 200 : 50 : 15 : : 500 : 0$ (1), $200 : 50 : 15 : 1000 : 0$ (2), $200 : 50 : 7,5 : 300 : 200$ (3) и $200 : : 50 : 7,5 : 0 : 500$ (4)

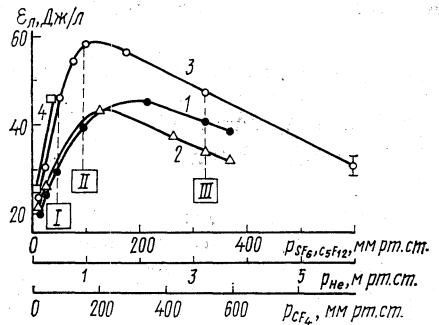


Рис. 2. Зависимость удельного энергосъема ХЛ от давления газа-разбавителя при $[F]_0 = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для смесей $F_2 : H_2 : O_2 : M : He = 75 : 25 : 7,5 : 0 : p_{He}$ (1), $75 : : 25 : 7,5 : p_{CF_4} : (25 - 50)$ (2), $75 : 25 : 7,5 : p_{SF_6} : : (10 - 50)$ (3) и $75 : 25 : 7,5 : p_{C_5F_{12}} : (10 - 25)$ (4) мм рт. ст.

Левее точек I $[O_2][M] \approx \text{const}$

смесей с различными концентрациями разбавителей при соотношении $F_2 : H_2 = 200 : 50$ мм рт. ст.

Из рис. 1 видно, что добавка SF_6 оказывает значительное влияние на энергию генерации $H_2 - F_2$ -лазера, причем степень этого влияния сильно зависит от $[F]_0$. Замена в рабочей смеси 500 мм рт. ст. He на такое же количество SF_6 при $[F]_0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ привела к трехкратному увеличению энергии генерации. При этом было получено $\epsilon_{л} = 120 \text{ Дж/л}$.

Поскольку толщина поглощающего слоя F_2 была примерно равна длине кюветы, т. е. 18 см, то при давлении F_2 200 мм рт. ст. имело место значительное поглощение иницирующего излучения. Это привело к высокой неоднородности начального иницирования по длине кюветы. Вследствие этого в дальнейших экспериментах использовались смеси $F_2 : H_2 = 75 : 25$ мм рт. ст. При таких давлениях фтора иницирование было практически однородным по длине.

На рис. 2 показаны зависимости $\epsilon_{л}$ от давлений различных газов-разбавителей ($He, SF_6, CF_4, C_5F_{12}$), полученные при $[F]_0 = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что соответствует степени диссоциации молекулярного фтора $\alpha = \Delta[F_2]/[F_2] = 2,8 \%$. На рис. 2 сопоставлены экспериментальные точки при таких давлениях газов-разбавителей, при которых одинаковы их теплоемкости c_v . Данные об удельных теплоемкостях основных компонентов рабочей смеси $H_2 - F_2$ -лазера, взятые из [9], представлены в таблице. Анализ приведенных на рис. 2 данных позволяет сделать вывод о том, что для каждого газа-разбавителя существует свое оптимальное давление, при котором достигается максимальное значение $\epsilon_{л}$, причем характер кривых не зависит от рода разбавителя. Максимумы $\epsilon_{л}$ достигаются при примерно одинаковых теплоемкостях разбавителей, а следовательно, и смесей в целом. Оптимальному разбавлению смеси соответствует оптимальный температурный режим протекания цепной фтороводородной реакции [3, 10]. Его наличие вытека-

Вещество	c_p при $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, Дж/моль·К				
	298,15К	400К	600К	1000К	1500К
F_2	31,32	33,01	35,18	37,01	37,94
H_2	28,83	29,18	29,32	30,20	32,27
O_2	29,36	30,10	32,09	34,87	36,56
HF	29,14	29,15	29,23	30,17	32,23
He	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
SF_6	96,26	117,9	133,5	147,2	158,1
CF_4	61,21	72,63	87,03	98,95	—

ет из специфики температурных зависимостей скоростей цепной реакции и колебательно-поступательной дезактивации возбужденных молекул HF [1], а также из уменьшения коэффициента усиления активной среды при повышении ее температуры. При 300 К скорость цепной реакции минимальна. Она эффективно растет с температурой до 1000—1200К, далее ее рост замедляется. Скорость VT-дезактивации молекул HF сначала падает с температурой до $\sim 800\text{К}$, а затем также начинает повышаться. Поэтому область температур $\sim 1000\text{К}$ неблагоприятна для лазера, а нагрев до 700—800К сказывается положительно. Это означает, что при малом давлении разбавителя наблюдается чрезмерный перегрев смеси, а при высоких давлениях, наоборот, температура не достигает оптимального значения. Спад энергии генерации при высоких давлениях разбавителя также обусловлен возрастанием роли гибели активных центров в реакции тройной рекомбинации [2]. В связи с этим следует отметить, что скорость указанного процесса с участием многоатомных молекул приблизительно на порядок выше, чем с участием He. Поэтому, несмотря на значительно меньшие по сравнению с He концентрации многоатомных газов, скорость гибели активных центров будет примерно одинаковой в обоих случаях.

Прямым подтверждением температурного эффекта являются представленные на рис. 3 осциллограммы импульсов генерации HF-лазера, из которых видно, что независимо от рода разбавителя длительность импульса генерации изменяется одинаковым образом при увеличении теплоемкости смеси. Подобное поведение длительности генерации наблюдалось нами и при других уровнях начального инициирования, а также для других составов смеси.

Из рис. 2 видно, что при одинаковом характере зависимости ϵ_d от давления различных газов-разбавителей, при использовании SF₆ энергия генерации HF-лазера приблизительно в полтора раза больше, чем с другими газами. По нашему мнению, такое отличие не связано с увеличением теплоемкости SF₆ при возрастании температуры [3], поскольку для CF₄ зависимость теплоемкости от температуры еще более сильная (см. таблицу), однако энергии генерации, полученные при использовании в качестве разбавителей CF₄ и He, примерно одинаковы. Вероятно, указанное отличие обусловлено более высокой эффективностью молекул SF₆ в ускорении процесса установления вращательного равновесия молекул HF. По-видимому, таким же свойством обладают и молекулы C₅F₁₂ [2]. К сожалению, для этих молекул экспериментальные точки были получены нами лишь при давлениях ниже 50 мм рт. ст. При более высоких давлениях C₅F₁₂ после каждого выстрела внутренняя поверхность стенок и окон кюветы ХЛ покрывалась

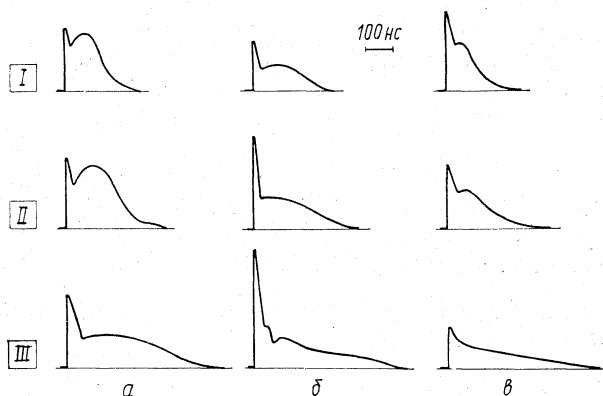


Рис. 3. Осциллограммы импульсов генерации ХЛ для смесей, разбавленных SF₆ (а), He (б) и CF₄ (в), полученные при различных давлениях газа-разбавителя; номера осциллограмм соответствуют номерам точек на рис. 2

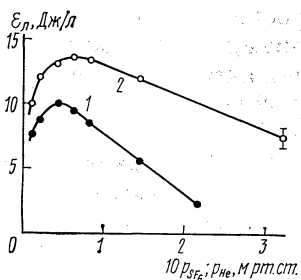


Рис. 4. Зависимость удельного энергосъема ХЛ от давления газа-разбавителя при $[F]_0 = 1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для смесей, разбавленных He (1) и SF_6 (2). Состав смесей тот же, что для кривых 1, 3 на рис. 2

110 мм рт. ст. При этом рост энергии генерации, достигаемый при замене He на SF_6 , в настоящей работе составил 1,4 раза, что сравнимо с результатами [4], где энергия генерации возростала примерно в два раза. Качественный ход зависимостей, полученных в [4], также согласуется с нашими результатами.

Из приведенных данных видно, что увеличение начального инициирования сопровождается ростом оптимального разбавления смеси. Так, например, при использовании SF_6 максимальные значения $\epsilon_{\text{л}}$ были получены нами для $\alpha = 0,24 \%$ при соотношении $\text{SF}_6:\text{F}_2 = 4:5$, а для $\alpha = 2,8 \%$ при $\text{SF}_6:\text{F}_2 = 4:3$. Очевидно, это объясняется необходимостью скомпенсировать чрезмерное увеличение скорости цепной химической реакции, связанное с ростом начальной концентрации активных центров, что и достигается увеличением разбавления. Об этом же свидетельствуют результаты исследований, выполненных нами при более высокой степени начального инициирования для смесей с малым содержанием водорода и фтора. При соотношении $\text{F}_2:\text{H}_2 = 3:3$ мм рт. ст. и $\alpha = 8 \%$ зависимости $\epsilon_{\text{л}}$ от давлений He и SF_6 имели аналогичный вид с максимумами при 20 и 150 мм рт. ст. для SF_6 и He соответственно; т. е. в этом случае применительно к SF_6 оптимальное разбавление, как и следовало ожидать, возросло и составило $\text{SF}_6:\text{F}_2 = 20:3 = 6,6$.

Таким образом, наши результаты исследования влияния добавок многоатомных газов на энергетику H_2-F_2 -лазера свидетельствуют о существовании двух механизмов, первый из которых, связанный с изменением теплоемкости, является общим для всех газов, а второй, связанный с ускорением установления вращательного равновесия молекул HF, присущ лишь отдельным газам (например, SF_6 , C_5H_{12}). При этом степень влияния указанных добавок сильно зависит от начальных условий эксперимента.

слоем копоти, что, возможно, было связано с пиролизом C_5F_{12} и крайне затрудняло проведение экспериментов.

Используя в качестве разбавителей He и SF_6 , мы провели подобные исследования и при более низком значении $[F]_0 = 1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($\alpha = 0,24 \%$). На рис. 4 представлены зависимости $\epsilon_{\text{л}}$ от давлений He и SF_6 , полученные в этих условиях. Видно, что при снижении начального инициирования более чем на порядок качественный ход зависимостей сохранялся, однако оптимальное давление разбавителя в этом случае уменьшалось приблизительно в два раза и составило 60 мм рт. ст. для SF_6 и 500 мм рт. ст. для He. Приведенные значения несколько отличаются от данных [4], где в близких условиях эксперимента соответствующие оптимальные давления для названных газов были 35 и

1. Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса, Дж. Ботта. — М.: Мир, 1980.
2. Г. К. Васильев, В. И. Гурьев, В. Л. Тальрозе. *ЖЭТФ*, 72, 943 (1977).
3. С. Д. Великанов, С. Б. Кормер, М. В. Сеницын, В. Д. Урлин, Г. В. Тачаев, В. В. Шуруп. *Письма в ЖТФ*, 9, 134 (1983).
4. Е. Б. Гордон, В. И. Матюшенко, В. Д. Сизов. *Квантовая электроника*, 9, 2186 (1982).
5. К. Л. Комра, J. H. Parker, G. C. Pimentel. *J. Chem. Phys.*, 49, 4257 (1968).
6. В. И. Игошин, А. Н. Ораевский. *Краткие сообщения по физике*, ФИАН, № 7, 27 (1976).
7. Г. К. Васильев, Е. Ф. Макаров, А. Г. Рябенко, В. Л. Тальрозе. *ЖЭТФ*, 71, 1320 (1976).
8. А. С. Башкин, В. А. Золотарев, Л. В. Кулаков, М. П. Фролов. *Квантовая электроника*, 13, 1065 (1986).
9. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Киикоина. — М.: Атомиздат, 1976.

10. А. С. Башкин, В. И. Игошин, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов. Химические лазеры. — М.: Наука, 1982.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
9 июля 1986 г.

A. S. Bashkin, V. A. Zolotarev, V. N. Tomashov, M. P. Frolov. **On an Effect of Polyatomic Gases on the Photoinitiated H_2-F_2 Laser Energy.**

An effect of addition of polyatomic gases on energy parameters of an H_2-F_2 laser has been studied under controlled original initiation. The results obtained indicate an existence of two mechanisms for raising the H_2-F_2 laser energy. The first mechanism is common for all gases and is related to changes in the heat capacity. The second mechanism is inherent to certain gases only and is related to an acceleration of setting the rotational equilibrium of HF molecules. A degree of influence of the polyatomic gases depends strongly on initial experimental conditions.