

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ГЕНЕРАЦИИ И
УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОСЪЕМА В ХИМИЧЕСКОМ DF/CO₂-ЛАЗЕРЕ

Б. И. Игошин, В. М. Никитин, А. Н. Орловский

УДК 621.375.826

Теоретически показана возможность существенного одновременного увеличения удельного энергосъема $\epsilon_{\text{д}}$ и квантового выхода генерации f в DF/CO₂-лазере до значений $\epsilon_{\text{д}} = 300 + 700$ Дж/л и $f = 4700 + 1000$. Эти характеристики достигаются за счет увеличения давления смеси до нескольких атмосфер и одновременной оптимизации ее состава и условий инициирования.

Высокие потенциальные возможности химического лазера на смеси D₂ + F₂ + CO₂ + He (DF/CO₂-лазера), обусловленные цепным механизмом накачивающей реакции D₂ + F₂, были в известной мере выявлены уже в самых ранних кинетических расчетах по этой системе /1,2/ и первых экспериментах /3,4/. Максимальное реализованное в настоящее время значение удельного энергосъема в DF/CO₂-лазере, равное 150 Дж/л /5/, является одним из наиболее высоких для газовых лазеров.

В настоящей работе теоретически показана возможность существенного увеличения в химическом DF/CO₂-лазере удельного энергосъема $\epsilon_{\text{д}}$ и квантового выхода генерации f . Квантовый выход генерации определяется как отношение числа лазерных квантов, малочисленных единичным объемом, к концентрации активных центров n_{a} ссы данных иницирующим источником,

$$f = \epsilon_{\text{д}} / (\hbar\omega_{\text{л}} / \nu_{\text{в}}),$$

где $\epsilon_{\text{д}}$ — удельная энергия излучения, $\hbar\omega_{\text{л}}$ — энергия лазерного фотона. КПД лазера по поглощенной энергии η и полный технический КПД лазера пропорциональны квантовому выходу генерации

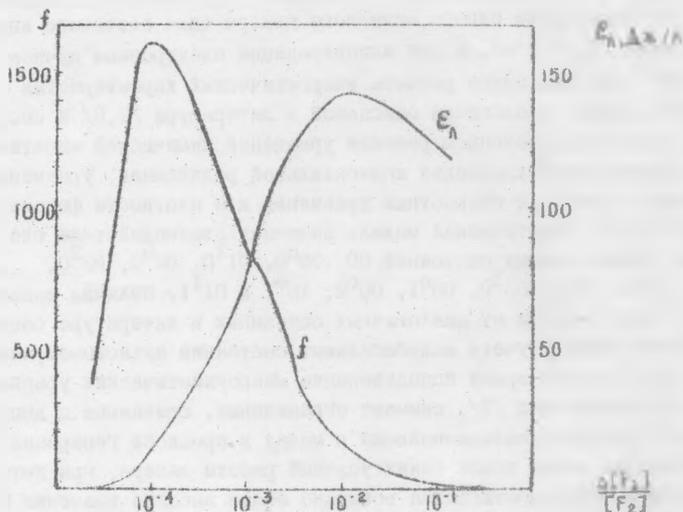
$$\eta = (\hbar\omega_{\lambda} / \epsilon_a) \tau,$$

$$\eta_{\text{тех}} = \eta \eta_{\text{ист}}$$

где $\eta_{\text{ист}}$ - КПД инициирующего источника, ϵ_a - энергия, затрачиваемая на образование одного активного центра (для светового инициирования $\epsilon_a \approx 2$ эВ, а для инициирования электронным пучком $\epsilon_a \approx 12$ эВ). Методика расчета энергетических характеристик DF/CO₂-лазера аналогична описанной в литературе /2,6/ и состоит в совместном численном решении уравнений химической кинетики, микрокинетических уравнений колебательной релаксации, уравнения теплового баланса и скоростных уравнений для плотности фотонов в резонаторе. Кинетическая модель включает взаимодействие следующих колебательных состояний CO₂: 00⁰⁰, 01¹⁰, 02⁰⁰, 02²⁰, 10⁰⁰, 11¹⁰, 03¹⁰, 03³⁰, 00⁰¹, 00⁰², 10⁰¹ и 01¹¹. Отличие используемой здесь модели от аналогичных описанных в литературе состоит в более полном учете колебательных состояний антисимметричной моды CO₂. В то же время использование микрокинетических уравнений, а не энергетических /7/, снимает ограничения, связанные с допущением о наличии квазиравновесия в модах в процессе генерации.

Очевидно важен поиск таких условий работы лазера, при которых одновременно достигаются возможно более высокие значения ϵ_{λ} и τ . В химических лазерах эти два требования противоречивы. Увеличение ϵ_{λ} , которое может быть достигнуто более интенсивным инициированием реакции и повышением p_a , сопровождается падением τ . Такое поведение энергетических характеристик DF/CO₂-лазера проиллюстрировано на рис. 1, где представлены результаты расчетов по описанной методике удельной энергии и квантового выхода генерации для смеси D₂:F₂:CO₂:He = 69:69:271:341 тор в зависимости от степени диссоциации фтора $\Delta[F_2]/[F_2]$. Из этих расчетов видно, что удельный энергосъем ϵ_{λ} с ростом $\Delta[F_2]/[F_2]$ проходит через максимум в области относительно низких значений степени диссоциации $\sim 1\%$. Рассчитанное максимальное значение ϵ_{λ} , равное 141 Дж/л, достаточно хорошо согласуется с максимальным значением ϵ_{λ} для той же смеси, полученным в эксперименте и равном 150 ± 30 Дж/л /5/. При значениях $\Delta[F_2]/[F_2]$, превышавших 1%, удельная энергия излучения падает. Интерпретация этого эффекта, характерного для DF/CO₂-лазера, дана в

/2/. Максимальный квантовый выход генерации $\tau = 1,6 \cdot 10^3$ достигается при еще меньших значениях $\Delta(F_2)/[F_2] \approx 10^{-2}\%$. Существенно, что в области максимальных значений τ как функции $\Delta(F_2)/[F_2]$ удельный энергосъем $\epsilon_{\lambda} = 17$ Дж/л заметно ниже



Р и с. 1. Зависимость удельной энергии и квантового выхода генерации от степени диссоциации фтора $\Delta(F_2)/[F_2]$. Состав смеси - $D_2:F_2:CO_2:He = 69:69:271:341$ тор

по сравнению с его возможным максимальным значением, как функции той же переменной. Естественно спросить: является ли альтернативный выбор - или высокий энергосъем, или высокий квантовый выход (и технический КПД) - неизбежным? Численный расчет показывает, что в смеси с увеличенным содержанием F_2 можно увеличить квантовый выход генерации до значений $f \approx 1400$, сохранив энергосъем на довольно высоком уровне $\epsilon \approx 100$ Дж/л (табл. 1а), в то время как для стехиометрической смеси D_2 и F_2 $\tau = 750$ при $\epsilon_{\lambda} = 100$ Дж/л. Наиболее существенный результат

Таблица I

Зависимость энергетических характеристик DF/CO_2 -лазера от
уровня ионизирования $\Delta[\text{F}_2]/[\text{F}_2]$:

а) $\text{D}_2:\text{F}_2:\text{CO}_2:\text{He} = 61:228:182:289$ тор

$\Delta[\text{F}_2]/[\text{F}_2]$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
n_{F} см^{-3}	$3,68 \cdot 10^{14}$	$3,68 \cdot 10^{15}$	$3,68 \cdot 10^{16}$
$\epsilon_{\text{л}}$ Дж/л	26,6	95	85
τ	3800	1360	122

б) $\text{D}_2:\text{F}_2:\text{CO}_2:\text{He} = 610:2280:\text{PCO}_2:2280$ тор

P_{CO_2}	2432	1216	243,2	2432	2432	
$\Delta[\text{F}_2]/[\text{F}_2]$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	
n_{F} см^{-3}	$3,68 \cdot 10^{16}$	$3,68 \cdot 10^{15}$	$3,68 \cdot 10^{15}$	$3,68 \cdot 10^{16}$	$3,68 \cdot 10^{17}$	
t мкс	3,7	4,5	3,3	1,1	0,24	
$\epsilon_{\text{л}}$ Дж/л	176	323	333	737	494	
η %	эл. п.	2520	4600	4750	1050	71
	у. ф.	15200	28000	28800	6350	430
τ	2520	4600	4750	1050	71	

расчета состоит в том, что дальнейшего значительного увеличения ϵ_d можно достичь за счет повышения давления реагентов (и буферного газа), сохраняя концентрацию активных центров постоянной. Это означает также, что при такой постановке опыта с ростом давления реагентов одновременно с увеличением ϵ_d будет увеличиваться и квантовый выход генерации f . При этом для наиболее яркого проявления эффекта одновременного увеличения ϵ_d и f с ростом давления необходимо оптимизировать относительное содержание CO_2 . Результаты расчета ϵ_d и f при повышенных в десять раз парциальных давлениях реагентов и буферного газа представлены в табл. 1б, где для полноты приведены также значения КПД по поглощенной энергии для светового инициирования и инициирования электронным пучком. Из этих данных видно, что при повышенных, но вполне приемлемых, давлениях смеси $p = 7$ атм, величина ϵ_d достигает $330 + 740$ Дж/л при квантовом выходе $4750 + 1050$, обеспечивающем очень высокий КПД по поглощенной энергии. Оптимальными с точки зрения одновременного достижения высоких значений ϵ_d и f представляются условия, указанные в третьем столбце табл. 1б, для которых $\epsilon_d = 330$ Дж/л, $f = 4750$, а длительность генерации $t_d \geq 3$ мкс.

Используя формулы, приведенные в /8/, можно показать, что для образования требуемой концентрации центров $n_d = 3,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ за время $t_0 \approx 2$ мкс необходим электронный пучок с плотностью тока $j_{\text{п}} \approx 0,1 \text{ А/см}^2$.

Возможен вариант с более коротким иницированием, но пропорционально большей плотностью тока электронного пучка, например: $t_0 = 20$ нс, $j_{\text{п}} = 10 \text{ А/см}^2$. Требуемые параметры иницирующего импульса отвечают возможностям электронных пушек, используемых в импульсных электроинжекционных лазерах для создания проводимости среды /9/.

Необходимо отметить, что режимы излучения с высоким квантовым выходом критичны к содержанию кислорода в смеси, приводящего к гибели активных центров в процессе тримолекулярной реакции $D + O_2 + M \rightarrow \text{DO}_2 + M$. Расчеты показывают, что реализация прогнозируемых режимов возможна при парциальном давлении кислорода не превышающем $1 + 10$ торр.

Поступила в редакцию
10 мая 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. И. Игошин, Доклад на юбилейной научной конференции Московского физико-технического института, 26-27 ноября, 1971 г. Программа конференции, стр. 35, М., 1971 г.
2. В. И. Игошин, Кандидатская диссертация, ФИАИ, М., 1972 г., Труды ФИАИ, т. 76, стр. 117-145, 1974 г.
3. Н. Г. Басов, В. Т. Галочкин, Л. В. Кулаков, Е. П. Маркин, А. И. Никитин, А. Н. Ораевский, Краткие сообщения по физике ФИАИ, № 8, 10 (1970).
4. Н. Г. Басов, С. И. Заворотный, Е. П. Маркин, А. И. Никитин, А. Н. Ораевский, Письма в ЖЭТФ, 15, 135 (1972).
5. Н. Г. Басов, А. С. Балкин, П. Г. Григорьев, А. Н. Ораевский, О. В. Породинков, Квантовая электроника, 3, 2067 (1976).
6. А. С. Башкин, В. И. Игошин, А. И. Никитин, А. Н. Ораевский, Химические лазеры, Итоги науки и техники, сер. "Радиотехника" т. 8, М., 1975 г.
7. В. А. Щеглов, Кандидатская диссертация, ФИАИ, М., 1969 г.
8. В. И. Игошин, В. Ю. Никитин, А. Н. Ораевский, Квантовая электроника, 3, 2072 (1976).
9. В. А. Даниличев, О. М. Керимов, И. Б. Ковш, Молекулярные газовые лазеры высокого давления, Итоги науки и техники, сер. "Радиотехника", т. 12, М., 1977 г.