

М.В. Ерофеев, В.М. Орловский, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

Энергетические, временные и спектральные характеристики нецепного HF-лазера с накачкой планарным пучком электронов и разрядом, инициированным пучком электронов

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию

Приведены экспериментально полученные энергетические, временные и спектральные характеристики HF-лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой планарным пучком электронов и несамостоятельным разрядом. Показано, что при использовании для возбуждения молекул HF импульсного разряда низкого давления, инициируемого потоком электронов, энергия излучения возрастает в 2,8 раза. Установлено, что лазерный импульс имеет сложный спектрально-временной состав, обусловленный последовательной генерацией P -линий $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_6$ и перекрытием во времени отдельных вращательных линий излучения одной и той же колебательной полосы.

В последнее время значительно возрос интерес к фтороводородным лазерам с накачкой цепной [1, 2] и нецепной [3–6] химическими реакциями, инициируемыми пучком электронов и разрядами, в частности разрядами, формируемыми потоком электронов. Применение электронных пучков вызвано высокой проникающей способностью электронов. С их помощью можно однородно инициировать большие объемы активной среды химического фтороводородного лазера при достаточно высоких давлениях и обеспечивать значительные мощности накачки. Кроме того, возможности различных применений фтороводородных лазеров с нецепным механизмом накачки, излучающих в ИК-области спектра, накладывают целый ряд условий на их характеристики и в том числе на спектральный диапазон генерации. Однако оптимальные условия работы нецепных HF- и DF-лазеров и в настоящее время остаются недостаточно изученными.

В данной статье приводятся результаты исследований энергетических, спектральных и временных характеристик HF-лазера с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой планарным пучком электронов и разрядом, формируемым потоком электронов. Последний способ накачки ранее использовался в работе [7].

1. Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты проводились на установке, аналогичной той, которая описана в [8]. Ускоритель позволял формировать поток электронов со следующими параметрами: плотность тока $2,5 \text{ A/cm}^2$, сечение потока электронов $42 \cdot 1,5 \text{ см}$, длительность 50 нс на полувысоте амплитуды тока и энергия электронов после фольги 155 кэВ (максимум на кривой зависимости энергии электронов от их числа). Инициирование химической реакции осуществлялось либо пучком электро-

нов, либо в процессе несамостоятельного разряда от конденсаторной батареи емкостью $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$, инициируемого пучком электронов. Расстояние анод – катод составляло $2,3 \text{ см}$. Резонатор лазера был образован сферическим медным зеркалом радиусом $2,5 \text{ м}$ и плоскопараллельной пластиной из КРС-5 с отражением в области 3 мкм 33% . Для определения энергии излучения использовались калориметры ИМО-2Н и ИКТ-1Н. Временные характеристики импульса излучения регистрировались с помощью охлаждаемого фотоприемника ФСГ-22-3А2 со спектральной чувствительностью в области $1,5\text{--}11 \text{ мкм}$. Спектральные характеристики излучения измерялись с помощью монохроматора МДР-12, в котором в качестве дисперсионного элемента использовалась отражательная дифракционная решетка 300 штр./мм (обратная линейная дисперсия $9,6 \text{ нм/мм}$). Импульсы тока пучка электронов и тока через разрядный промежуток регистрировались с помощью калиброванных токовых шунтов.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Энергетические характеристики лазерной системы (рис. 1) при инициировании газовой смеси $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 7:1$ потоком электронов с вышеприведенными характеристиками измерялись в диапазоне давлений $0,1\text{--}1 \text{ атм}$. Во всем диапазоне давлений эта смесь была близка к оптимальной. Дальнейшее повышение концентрации H_2 приводило к незначительному повышению энергии, а затем и к ее спаду. Изменение поглощенной энергии электронного пучка в газовой среде оценивалось по формуле

$$W_{\text{п}} = j_{\text{п}} (dE/dx) V t_{\text{п}},$$

где $j_{\text{п}}$ – плотность тока пучка; dE/dx – средняя потеря энергии на единицу длины; V – объем активной области газовой кюветы и $t_{\text{п}}$ – длительность пучка электронов.

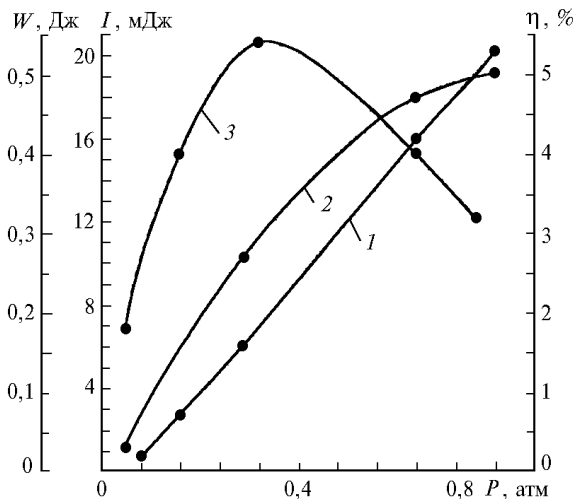


Рис. 1. Зависимость энергии, рассеянной в газе (кривая 1), энергии излучения (2) и КПД (3) от давления активной среды $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 7:1$

В качестве средней энергии распределения электронов по скоростям была выбрана величина 130 кэВ, и средние потери энергии потока электронов на единицу длины составили $1,8 \cdot 10^3$, $3,5 \cdot 10^3$, $6,48 \cdot 10^3$, $19 \cdot 10^3$ эВ/см [9] соответственно давлениям 0,096; 0,184; 0,344; 0,82; 1 атм газовой смеси $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 7:1$. Динамика изменения энергии излучения такова, что она имеет тенденцию к насыщению и обусловлена энергетическим спектром электронного пучка. Такие зависимости наблюдались ранее [6, 7, 10], и величина максимального значения энергии излучения на шкале давлений целиком определяется ростом скоростей химических реакций с увеличением давления лазерной среды, с одной стороны, и увеличением скорости столкновительной дезактивации молекул HF – с другой. Это приводит к уменьшению КПД, а при дальнейшем увеличении давления – и энергии излучения. Отметим, что на величину оптимального давления с точки зрения достижения максимальной эффективности излучения может оказывать и спектр вторичных электронов, который зависит от состава и давления рабочей смеси [11].

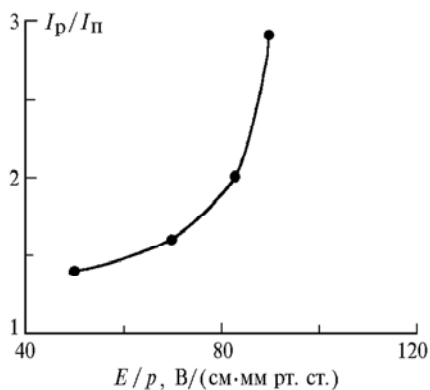


Рис. 2. Зависимость увеличения выходной энергии лазера от значений параметра E/p . I_p и I_n – энергия излучения в случае возбуждения активной среды потоком электронов и импульсным разрядом, инициируемым потоком электронов, соответственно. Смесь $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 7:1$, $p = 0,184$ атм

Для исследования влияния дополнительного электрического поля на эффективность генерации на газовый промежуток подавалось постоянное напряжение. Введение внешнего электрического поля позволяет в процессе импульсного несамостоятельного разряда повысить среднюю энергию вторичных электронов и тем самым обеспечить более интенсивную наработку фтора [7]. На рис. 2 приведена зависимость относительного изменения излучения лазера от E/p (E – напряженность электрического поля, p – давление), отмечающая рост лазерной энергии в 2,8 раза при напряжениях электрического поля, близких к пробивным. Однако следует отметить, что энергия, рассеянная в газе в процессе импульсного разряда, больше поглощенной энергии пучка электронов на порядок, соответственно эффективность лазера при этом уменьшается. Следует ожидать увеличения общей эффективности при напряжениях выше статического пробивного.

На энергетические характеристики HF-лазеров существенное влияние оказывают процессы дезактивации. Эффективности дезактивации различных частиц могут отличаться значительно, наиболее эффективно дезактивируют молекулы, силы притяжения между которыми определяются водородной связью и приводят к образованию долго живущих комплексов. Так, молекула H_2O дезактивирует любую молекулу за несколько столкновений, молекула HF дезактивирует молекулу HF* примерно за 60 столкновений [12]. Поэтому по мере наработки молекул HF в процессе многократных включений наблюдается спад энергии. На рис. 3 представлены зависимости энергии излучения от числа включений для газовой смеси $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 7:1$ при использовании поглотителя, кривые – 1, 2, и без поглотителя – кривая 3. Поглотитель на основе цеолита равномерно распределялся по поверхности подложки из титана, расположенной вдоль всего активного объема. Видно, что использование поглотителя на основе цеолита позволяет уменьшить относительный спад энергии излучения с 40 до 13% в исследуемом интервале включений.

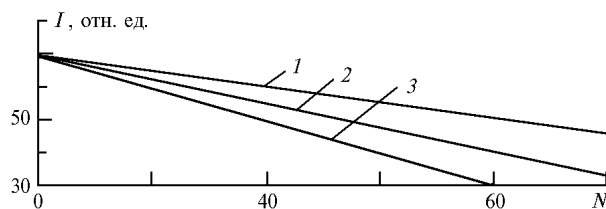


Рис. 3. Относительное изменение энергии излучения от числа включений ускорителя в присутствии поглотителя. Объем поглотителя: 1 – 4, 2 – 6, 3 – 0 см³

Спектрально-временные характеристики исследовались как для суммарного лазерного сигнала, так и для отдельных линий в диапазоне давлений 0,1–1 атм. На рис. 4 представлены типичная осциллограмма импульса излучения (а) и зависимость длительности излучения на полувысоте от давления (б). Длительность излучения изменялась от 150 нс при 1 атм до 600 нс при 0,1 атм. Момент появления лазерного излучения также менялся в зависимости от давления от 20 нс при 1 атм до 97 нс при 0,1 атм относительно начала воздействия на газовую среду потока электронов. Такая динамика изменения длительности излучения определяется увеличением скорости ввода энергии с ростом давления и скорости химических реакций.

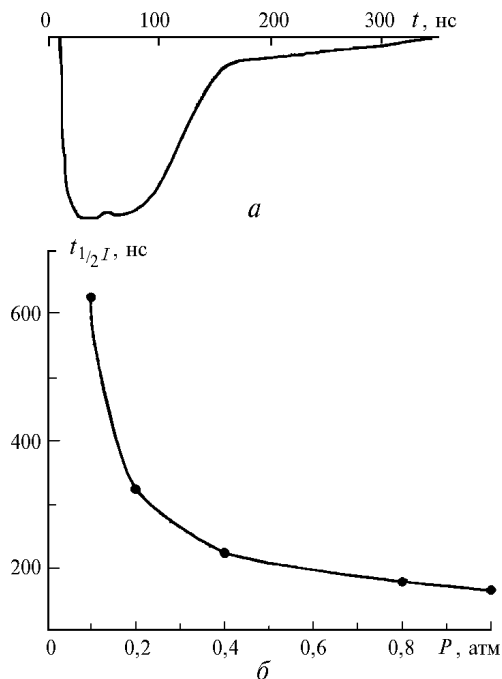


Рис. 4. Осциллограмма импульса излучения (а) ($p = 0,344$ атм) и зависимость длительности импульса излучения на полувысоте от давления смеси (б) в смеси $SF_6:H_2 = 7:1$

Распределение энергии по спектру для лазерной смеси $SF_6:H_2 = 7:1$ приведено в таблице. Для давлений 0,82 и 0,344 атм генерация наблюдалась на переходах P -ветви ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$) и максимальное значение энергии соответствовало переходу P_2 . Уменьшение давления до 0,096 атм приводило к генерации излучения на переходах P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 и смещению максимума генерации на переход P_1 .

Временная структура появления генерации такова, что генерация фиксировалась последовательно на наиболее интенсивных линиях переходов $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_6$, при этом линии переходов P_4, P_5, P_6 фиксировались во второй половине временного интервала суммарного лазерного сигнала.

Распределение энергии по спектру для лазерной смеси $SF_6:H_2 = 7:1$

P	J	I , отн. ед.			
		0,85 атм	0,344 атм	0,096 атм	
P_1	2	9	—	—	
	3	5	—	—	
	4	4	2	13	
	5	4,5	13	24	
	6	5	16	110	
	7	30	31	140	
	8	8	9	41	
	9	9	11	16	
	10	2	2	0,5	
	11	1	0,5	—	
	12	0,5	—	—	
	P_2	2	28	7	9
3		40	6,5	113	
4		50	258	94	
5		240	250	18	
6		16	64	4	
7		42	50	4	
8		28	6	0,5	
9		4	4	0,5	
10		2	2	—	
11		1	0,5	—	
P_3		4	—	—	2
	5	10	4	11	
	6	19	21	8	
	7	12	20	6	
	8	12	7	0,5	
	9	6	4	—	
	10	1	—	—	
	P_4	4	10	—	1
		5	20	3	2
		6	18	6	0,5
7		24	2	—	
8		8	—	—	
P_5	4	6	2	1	
	5	22	—	1	
	6	20	0,5	—	
	7	10	—	—	
	8	4	—	—	
P_6	4	4	0,5	—	
	5	6	—	—	
	6	2	—	—	

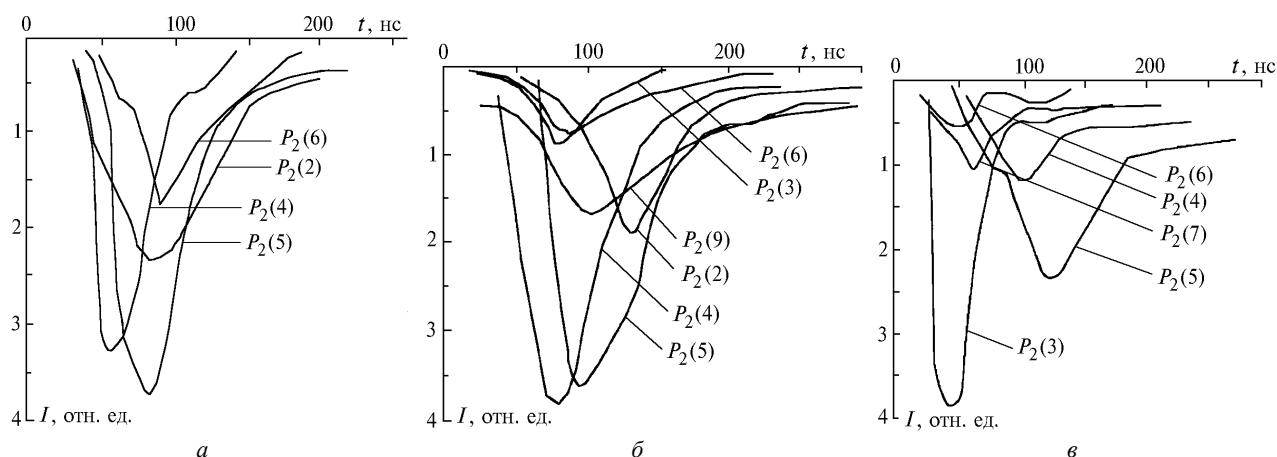


Рис. 5. Временной ход интенсивности отдельных линий перехода P_2 при различных давлениях в смеси $SF_6:H_2 = 7:1$: а – 0,82 атм; б – 0,344 атм; в – 0,096 атм

На рис. 5 приведены временные зависимости энергии генерации отдельных линий, зафиксированных на переходах полосы P_2 для различных давлений. Видно, что генерация на переходах P_2 с высоким вращательным числом J наблюдается одновременно с низкими J , что говорит о существенной неравномерности распределения энергии молекул по вращательным уровням.

1. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В. и др. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 2. С. 119–124.
2. Галаев И.И., Конкин С.В., Латышев А.Д. и др. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 3. С. 217–221.
3. Великанов С.Д., Синицин М.В., Урлин В.Д. и др. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 1. С. 25–28.
4. Costaud M., Boulsc J., Autric M. // Proc. 11th Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Lasers. Edinburg, GB. 1996. V. 3092. P. 585–588.
5. Абдулин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М. и др. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 9. С. 781–785.
6. Орловский В.М., Пономаренко А.Г., Соснин Э.А. и др. // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 1. С. 76–78.
7. Башкин А.С., Ораевский А.Н., Томашов В.Н. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 1. С. 169–171.
8. Серeda О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 6. С. 535–558.
9. Комар А.П., Круглов С.П., Лопатин Н.В. Измерение полной энергии пучков тормозного излучения от электронных ускорителей. Л.: Наука, 1972. С. 172.
10. Химические лазеры / Под ред. И.Г. Басова. М.: Наука, 1982. 400 с.
11. Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Скакун В.С. // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 3. С. 209–213.
12. Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса и Дж. Ботта. М.: Мир, 1980. 832 с.

M.V. Erofeev, V.M. Orlovskii, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. Power, temporary, and spectral characteristics of non-chain chemical HF-laser pumped by planar e-beam and e-beam initiated discharge.

An experimental characteristics of non-chain chemical SF₆-H₂ laser pumped by plane e-beam and non-sustained discharge are presented. It was shown that under initiated e-beam low-pressure pulsed discharge excitation of HF molecules, radiation grows to 2,8 times. It is found that a laser pulse has a complex spectral and temporary composition due to consecutive generation of the P-lines $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_6$ and overlapping of the separate rotational spectral lines of one vibrational spectral band.