

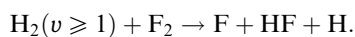
Химический фторводородный лазер на термоцепном взрыве, инициируемом резонансным ИК излучением

В.И.Игошин, С.Ю.Пичугин, И.Л.Стукалина

Теоретически исследованы характеристики химического H_2-F_2 -лазера, инициируемого через резонансное колебательное возбуждение молекул HF в условиях развития термоцепной разветвленной реакции. Показано, что при добавлении молекул N_2F_2 или F_2SO_3 с парциальным давлением 20 мм рт. ст. в смесь $HF:H_2:F_2:O_2:He = 0.5:76:228:23:100$ мм рт. ст. удельный энергосъем фторводородного лазера, инициируемого импульсом излучения H_2-F_2 -лазера с длительностью 2 мкс и плотностью энергии $0.01-10$ Дж/см², может составлять $30-60$ Дж/л, превышая удельную энергию инициирования в $100-4000$ раз.

Ключевые слова: импульсный химический H_2-F_2 -лазер, термическая диссоциация молекул, термоцепной взрыв.

В работе [1] нами был исследован механизм инициирования H_2-F_2 -лазера с помощью резонансного возбуждения молекул HF излучением импульсного фторводородного лазера с последующей передачей колебательной энергии молекулам H_2 , которые вступают в реакцию энергетического разветвления цепи



Теоретически было показано, что при действии импульса H_2-F_2 -лазера с плотностью энергии $0.1-10$ Дж/см² на смесь $HF-H_2-F_2-O_2-He$ при давлении 1.1 атм возможна генерация лазерного излучения при удельном энергосъеме около 10 Дж/л. Иницирование цепной реакции $H_2 + F_2$ излучением импульсного фторводородного лазера было зафиксировано экспериментально. Однако в эксперименте генерация излучения H_2-F_2 -лазера при таком способе инициирования не наблюдалась, что, вероятно, было обусловлено недостаточной однородностью приготавливаемых лазерных смесей.

Существенное увеличение удельного энергосъема фторводородного лазера при малом уровне инициирования фотолизом возможно в условиях осуществления в лазерной среде цепной реакции с тепловым механизмом разветвления [2], которую мы далее будем называть термоцепным взрывом. Данный механизм разветвления обусловлен термической диссоциацией специально подобранных фторсодержащих молекул RF, введенных в исходную лазерную смесь. Диссоциация таких молекул сопровождается образованием свободных атомов F и осуществляется в ходе разогрева смеси под действием тепла, выделяющегося в цепной реакции $H_2 + F_2$.

В работе [2] был подробно исследован вопрос о том, при каких константах скорости термической диссоциации молекул RF реализуется тепловой механизм разветвления цепной реакции и достигается высокий удельный

энергосъем в H_2-F_2 -лазере. Был найден ряд подходящих для этого молекул (F_2SO_3 , KrF_2 и др.), позволяющих получить удельный энергосъем $100-200$ Дж/л при очень малом уровне инициирования. При этом подавляющая часть энергии лазерного излучения генерируется за чрезвычайно малое время (~ 100 нс) после весьма длительного (в течение десятков микросекунд) разогрева лазерной смеси. Заметим, что в расчетах [2] использовалась модель фторводородного лазера, в которой не учитывалась вращательная неравновесность молекул HF. Ее учет может значительно снизить расчетный лазерный энергосъем в случае короткого импульса генерации.

В настоящей работе на основе модели, учитывающей конечность скорости вращательной релаксации, исследуется лазер на смеси $HF-H_2-F_2-O_2-He-F_2SO_3$ (N_2F_2), инициируемый резонансным колебательным возбуждением молекул HF многолинейчатым излучением импульсного H_2-F_2 -лазера. В данной среде возможно осуществление комбинированного энергетического и теплового разветвления цепной реакции $H_2 + F_2$, что сопровождается существенным ростом удельного энергосъема исследуемого лазера, инициируемого лазерным ИК излучением.

Рассмотрим среду H_2-F_2 -лазера: смесь $HF-H_2-F_2-O_2-He$, в которую подмешана легко диссоциирующая добавка RF. Возможность приготовления и стабильности подобной среды была рассмотрена в [2, 3]. При действии на данную среду импульса излучения H_2-F_2 -лазера с длительностью t_1 происходит резонансное колебательное возбуждение молекул HF с передачей колебательной энергии молекулам H_2 [1]. В результате процессов VV'-обмена образуются молекулы H_2 , возбужденные на колебательные уровни с $v \geq 1$. Эти молекулы вступают в реакцию с F_2 с образованием свободных атомов. Таким образом, в среде $HF-H_2-F_2-O_2-He-RF$ под действием внешнего излучения H_2-F_2 -лазера возникает некоторая концентрация свободных атомов $N_a(t_1)$ и происходит инициирование цепной реакции в смеси H_2-F_2 .

Если скорость образования свободных атомов в ходе энергетического разветвления цепи будет превышать ско-

рость их потерь при столкновении с молекулами O_2 , то разовьется самоускоряющийся процесс, сопровождающийся ростом N_a и температуры газовой среды T . В результате в некоторый момент времени скорость цепной реакции станет достаточной для начала генерации лазерного излучения.

В отсутствие в исходной лазерной смеси молекул RF удельный энергосъем данного H_2-F_2 -лазера, инициируемого ИК излучением, будет сравнительно небольшим (~ 10 Дж/л) [1]. В рассматриваемой же среде при достижении некоторой температуры T станет существенным процесс термической диссоциации молекул RF с образованием свободных атомов. При этом их концентрация будет резко увеличиваться, что приведет к генерации импульса лазерного излучения с достаточно большой энергией и малой длительностью [2]. В результате удельный энергосъем ε исследуемого H_2-F_2 -лазера, инициируемого излучением фторводородного лазера, может существенно (на порядок) вырасти. Соответственно значительно увеличится коэффициент усиления по энергии лазерного ИК излучения $K = \varepsilon/\varepsilon_0$, где ε_0 – удельная энергия инициирования [4].

Для нахождения характеристик фторводородного лазера на термоцепной разветвленной реакции, инициируемой излучением H_2-F_2 -лазера, мы провели численные расчеты на основе ранее разработанной модели [5]. При этом для учета резонансного возбуждения молекул HF внешним излучением фторводородного лазера использовались уравнения:

$$\frac{dn_v^j}{dt} = \frac{\alpha_{v,j+1}I_{v,j+1}}{h\nu_{v,j+1}} - \frac{\alpha_{v+1,j}I_{v+1,j}}{h\nu_{v+1,j}} + \frac{n_v - n_v^j}{M_j\tau_j} - \frac{n_v^j}{\tau_j} \quad (1)$$

Здесь n_v^j – удельная концентрация молекул HF на v -м колебательном и j -м вращательном уровнях; n_v – суммарная населенность v -го колебательного уровня HF; $\alpha_{v,j}$ – коэффициент поглощения молекулами HF излучения фторводородного лазера на переходе $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$ с интенсивностью $I_{v,j}$; $\nu_{v,j}$ – соответствующая частота излучения; τ_j – характерное время вращательной релаксации [1, 6]; $M_j = (2j+1)\exp[-j(j+1)Q/T]Q/T - 1$; Q – характеристическая вращательная температура молекулы HF. Для расчета времен вращательной релаксации τ_j брались константы скоростей RT-процессов с экспоненциальной зависимостью от изменения вращательной энергии, использованные в [7].

В соответствии с экспериментальными данными в расчетах полагалось, что импульс инициирующего излучения на каждом переходе $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$, где $v = 1-6, j = 4-12$, имеет вид равнобедренного треугольника с основанием от начала и до конца излучения данной линии [1, 7]. При этом временная зависимость суммарной интенсивности инициирующего импульса достаточно близка к экспериментально зафиксированной форме импульса излучения H_2-F_2 -лазера с длительностью 2 мкс [1].

Конкретные расчеты были проведены для смеси $H_2:F_2:O_2:He = 76:228:23:100$ мм рт.ст. ($T = 290$ К). Предполагалось, что в данной смеси находится легко диссоциирующая добавка F_2SO_3 либо транс- N_2F_2 при давлении 20 мм рт.ст. Константы скоростей диссоциации этих молекул в исследуемой среде полагались в расчетах следующими [2]: $k_d(F_2SO_3) = 3 \cdot 10^{13} \exp(-16500 \text{ К}/T) \text{ с}^{-1}$, $k_d(N_2F_2) = 5 \cdot 10^{11} \exp(-15500 \text{ К}/T) \text{ с}^{-1}$. Начальное давление HF считалось равным 0.5 мм рт.ст. Удельный

E_1 (Дж/см ²)	ε_0 (Дж/л)	N_a (см ⁻³)	ε (Дж/л)	Δt (мкс)	K
0.01	0.15	$1.6 \cdot 10^{10}$	60 (33)	311 (311)	3900 (2140)
0.1	0.11	$1.2 \cdot 10^{11}$	60 (33)	154 (154)	545 (300)
1	0.28	$3.7 \cdot 10^{11}$	61 (34)	97 (97)	220 (120)
10	0.36	$5 \cdot 10^{11}$	61 (34)	85 (85)	170 (95)

Примечание: в скобках – результаты расчетов при наличии в исходной смеси транс- N_2F_2 .

энергосъем ε генерируемого в этой среде лазерного излучения рассчитывался при пороговом усилении резонатора 0.005 см^{-1} .

Удельная энергия инициирования, представляющая собой удельную энергию инициирующего лазера, поглощенную в рабочей среде инициируемого лазера, рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon_0 = \int_0^{t_i} \left(\sum_{v,j} \alpha_{v,j} I_{v,j} \right) dt,$$

где $\alpha_{v,j}$ вычислялось с использованием уравнений (1). Результаты расчетов характеристик H_2-F_2 -лазера на термоцепном взрыве, инициируемом излучением фторводородного лазера при различных плотностях энергии E_1 , представлены в таблице. Здесь же приведены интервалы времени Δt , за которые импульс генерации достигает максимума.

Как видно из таблицы, расчетный энергосъем данного генератора практически не зависит от E_1 : $\varepsilon = 60$ Дж/л при наличии в исходной смеси F_2SO_3 и $\varepsilon = 33$ Дж/л в случае добавки N_2F_2 . Коэффициент усиления по энергии излучения фторводородного лазера уменьшается соответственно от $K = 3900-2140$ при $E_1 = 0.01$ Дж/см² до $K = 170-95$ при $E_1 = 10$ Дж/см². При этом интервал t_d между импульсом генерации, возникшим в результате термоцепного взрыва, и инициирующим импульсом составил 310–85 мкс. Таким образом, использование легко диссоциирующей добавки дает возможность существенно (в 5–10 раз) увеличить энергию импульса H_2-F_2 -лазера, инициируемого излучением фторводородного лазера.

На рис.1 представлена временная зависимость плотности мощности генерации H_2-F_2 -лазера на термоцепном взрыве в среде с исходным составом HF: H_2 : F_2 : O_2 :He: $F_2SO_3 = 0.5:76:228:23:100:20$ мм рт.ст. для $E_1 = 1$ Дж/см².

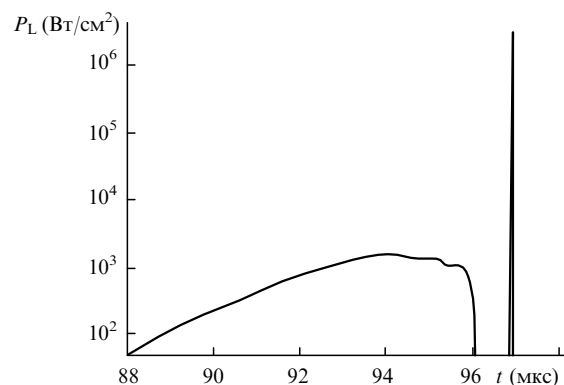


Рис.1. Временная зависимость плотности мощности генерации H_2-F_2 -лазера на термоцепном взрыве в среде HF- H_2 - F_2 - O_2 -He- F_2SO_3 для $E_1 = 1$ Дж/см².

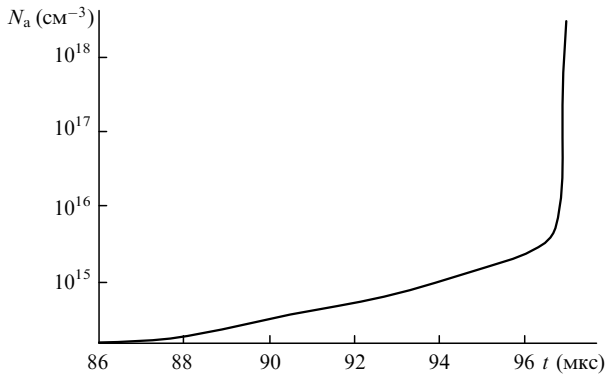


Рис.2. Временная зависимость концентрации свободных атомов в среде $\text{H}_2\text{-F}_2$ -лазера в условиях развития термического взрыва.

Как показывают расчеты, длительность импульса генерации, обусловленного термическим взрывом, весьма мала (~ 20 нс), и учет вращательной неравновесности при вычислении удельного лазерного энергосъема в этих условиях становится принципиальным. На рис.2, 3 приведены соответствующие зависимости от времени концентрации свободных атомов и температуры газовой среды. Существенный рост концентрации активных центров и мощности генерируемого излучения в рассматриваемом варианте начинается при достижении температуры лазерной смеси 1200–1300 К.

Таким образом, в настоящей работе теоретически исследован импульсный $\text{H}_2\text{-F}_2$ -лазер на термическом взрыве, инициируемом многолинейчатом излучением фторводородного лазера при резонансно-колебательном возбуждении молекул HF. Показано, что при наличии в смеси состава $\text{HF:H}_2\text{:F}_2\text{:O}_2\text{:He} = 0.5:76:228:23:100$ мм рт.ст. легко диссоциирующей добавки – транс- N_2F_2 либо F_2SO_3 с парциальным давлением 20 мм рт.ст. – удельный энергосъем $\text{H}_2\text{-F}_2$ -лазера, инициируемого импульсом излучения фторводородного лазера с плотностью энергии $0.01\text{--}10$ Дж/см², может достигать 60 Дж/л, превышая удельную энергию инициирования в 100–4000 раз.

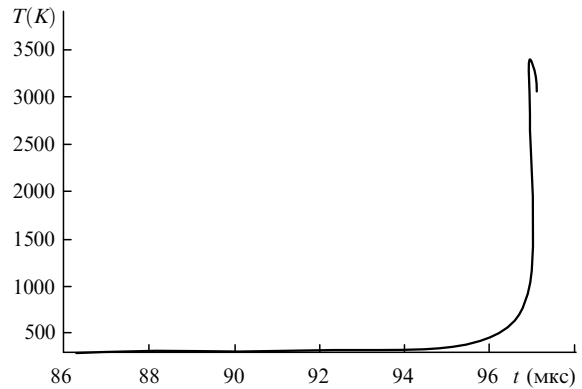


Рис.3. Временная зависимость температуры лазерной среды.

1. Азаров М.А., Дроздов В.А., Игошин В.И., Катулин В.А., Куров А.Ю., Петров А.Л., Пичугин С.Ю., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **25**, 401 (1998).
2. Байков Э.У., Башкин А.С., Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **14**, 151 (1987).
3. Байков Э.У., Башкин А.С., Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **14**, 943 (1987).
4. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **16**, 437 (1989).
5. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **21**, 417 (1994).
6. Башкин А.С., Курдоглыян М.С., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **194**, 49 (1989).
7. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **29**, 21 (1999).

V.I.Igoshin, S.Yu.Pichugin, I.L.Stukalina. Chemical $\text{H}_2\text{-F}_2$ laser on a thermal chain explosion initiated by IR radiation.

Characteristics of a chemical $\text{H}_2\text{-F}_2$ laser initiated by resonant vibrational excitation of HF molecules under conditions where a thermal chain branching reaction is developed are theoretically studied. The addition of N_2F_2 or F_2SO_3 molecules with partial pressure of 20 Torr to the $\text{HF:H}_2\text{:F}_2\text{:O}_2\text{:He} = 0.5:76:228:23:100$ Torr mixture is shown to give the specific output energy of a hydrogen fluoride laser initiated by a 2- μs pulse of an $\text{H}_2\text{-F}_2$ laser with energy density of $0.01\text{--}10$ J cm⁻² as high as $30\text{--}60$ J litre⁻¹, which exceeds the specific initiation energy by a factor of 100–4000.