

О возможности получения высоких энергетических характеристик H_2-F_2 -лазера на термоцепном взрыве, инициируемом ИК излучением

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

Теоретически исследован химический H_2-F_2 -лазер, инициируемый ИК излучением через колебательное возбуждение молекул HF, в условиях развития термоцепной разветвленной реакции, которая обусловлена термической диссоциацией введенных в исходную лазерную смесь газовых добавок. Показано, что при использовании добавки F_2SO_3 с парциальным давлением 40 мм рт.ст. удельный энергоотъем H_2-F_2 -лазера с давлением смеси 1 атм, инициируемой импульсом излучения фторводородного лазера, может достигать более 200 Дж/л при длительности генерации около 20 нс.

Ключевые слова: импульсный химический H_2-F_2 -лазер, термоцепной взрыв, энергетические характеристики.

Проблема инициирования химических лазеров ИК излучением уже сравнительно давно находится в поле зрения исследователей [1, 2]. В [2] была предложена и теоретически обоснована химически активная молекулярная система, инициируемая ИК излучением, в которой энергетический выход превышает затраты фотонов на инициирование. Это система $CH_3F-D_2-F_2-CO_2-He$, излучающая на длине волны 9.6 мкм (переход $00^0_1 \rightarrow 02^0_0$ молекул CO_2). В этой же работе впервые введен термин фотонно-разветвленная (ФР) цепная реакция, характеризующий кинетику физико-химических процессов в активной среде.

Следует отметить, что предположение общего характера о возможности разветвления цепей за счет энергии вновь излучаемых фотонов в молекулярных системах этого типа впервые высказано в работе [3], посвященной исследованию фотохимического действия ИК излучения. В [3, 4] была обнаружена возможность инициирования химических реакций ИК излучением в смесях, содержащих молекулы N_2F_4 , BCl_3 , SF_6 , резонансно поглощающие излучение CO_2 -лазера с $\lambda = 10.6$ мкм, при диссоциации которых возникают свободные атомы.

В [5, 6] проведены эксперименты по созданию химического HF-лазера на смеси SF_6-H_2 , инициируемого ИК излучением. Генерация излучения на колебательно-вращательных переходах молекул HF(DF) при инициировании реакции в смесях SF_6-H_2 и $N_2F_4-H_2$ (D_2) получена в [7, 8]. Во всех этих случаях энергия генерируемого излучения была крайне мала и составляла $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ энергии инициирующего импульса CO_2 -лазера. Это говорит о малой эффективности образования активных центров при диссоциации молекул SF_6 и N_2F_4 , резонансно поглощающих ИК излучение, что может быть объяснено быстрой релаксацией колебательной энергии этих молекул в лазерной среде.

Возможны и другие механизмы образования свободных атомов под действием ИК излучения, обусловленные нерезонансным взаимодействием этого излучения с веществом. В [9], например, описывается эксперимент по созданию импульсного HF-лазера, инициируемого излучением CO_2 -лазера при его фокусировке на алюминиевую пластинку, помещенную в газовую смесь SF_6-H_2 . Под действием ИК излучения в области, прилегающей к пластинке, возникает электронная плазма. В плазменном слое происходит диссоциация SF_6 с образованием атомов F. Энергетический выход созданного лазера очень мал – значительно меньше энергии инициирующего импульса. Работа [10] посвящена экспериментальному исследованию термического разложения твердых частиц NaN_3 при их нагреве излучением CO_2 -лазера. Отмечается, что возникающие при разложении NaN_3 атомы Na могут взаимодействовать с F_2 с образованием активных центров F.

Упомянутые исследования стимулировали постановку теоретических работ, в которых исследуется возможность создания импульсных химических лазеров на ФР реакциях. В основе реализации этих лазеров лежат новые механизмы образования свободных атомов под действием ИК излучения. Был предложен принципиально новый путь осуществления ФР цепных процессов, основанных на нерезонансном взаимодействии ИК излучения с дисперсными химически активными средами [11–13].

Идея заключается во введении в активную среду химического HF(DF)-лазера мелкодисперсных частиц, достаточно хорошо поглощающих ИК излучение (например, пассивированных частиц металла). Эти частицы под действием ИК излучения определенной интенсивности нагреваются до высоких температур за время порядка 1 мкс при практически неизменной температуре среды. При этом происходит испарение либо термическое разложение вещества частиц и инициирование цепной реакции.

В [12] численно исследована работа импульсного химического HF-лазера, инициируемого ИК излучением при испарении мелкодисперсных частиц алюминия, ин-

жективированных в лазерную среду. Показано, что удельный энергосъем фторводородного лазера с давлением смеси 1 атм при использовании частиц алюминия с диаметром 0.1–0.2 мкм и концентрацией 10^9 см^{-3} достигает 100–200 Дж/л, превышая удельные затраты энергии иницирующего излучения в 20 раз. В указанных условиях время перекрытия диффузных облаков (~ 0.1 мкс) от испаряемых частиц много меньше длительности хемолазерного процесса (> 1 мкс), что обеспечивает высокую однородность среды.

В предыдущих работах [14, 15] нами предложен новый подход к иницированию H_2 – F_2 -лазера внешним ИК излучением, в результате которого полученная выходная энергия превышает вложенную. Существенное увеличение удельного энергосъема фторводородного лазера при малых уровнях иницирования ИК излучением возможно при осуществлении в лазерной среде термоцепного взрыва, обусловленного диссоциацией специально подобранных фторсодержащих молекул RF.

В работе [16] был подробно исследован вопрос о том, при каких константах скорости термической диссоциации молекул RF реализуется тепловой механизм разветвления цепной реакции H_2 – F_2 , иницируемой УФ излучением. При этом основная часть энергии лазерного излучения генерируется за очень короткое время (~ 100 нс) после длительного (десять микросекунд) разогрева смеси. Расчеты в работе [16] проводились для модели фторводородного лазера, в которой вращательная неравновесность молекул HF не учитывалась. Это может существенно увеличить расчетный лазерный энергосъем при коротком импульсе генерации.

Среди предложенных для теплового разветвления молекул наиболее подходящей, на наш взгляд, является молекула F_2SO_3 . Она достаточно прочна (удельная энергия диссоциации 31 ккал/моль) и в то же время при температуре свыше 1000 К константа скорости ее термической диссоциации достаточно велика. В настоящей работе на основе модели, учитывающей конечность скорости вращательной релаксации, производится оптимизация энергетических характеристик лазера на смеси HF– H_2 – F_2 – O_2 –He– F_2SO_3 , иницируемого излучением импульсного фторводородного лазера. При этом варьируются состав смеси и вращательное квантовое число для генерируемого излучения.

Рассмотрим среду фторводородного лазера на смеси HF– H_2 – F_2 – O_2 –He– F_2SO_3 . При действии на данную среду импульса излучения H_2 – F_2 -лазера с длительностью t_i происходит резонансное колебательное возбуждение молекул HF с передачей колебательной энергии молекулам H_2 [14]. В результате процессов VV'-обмена образуются колебательно-возбужденные молекулы H_2 ($v \geq 1$). При реакции этих молекул с F_2 образуются свободные атомы. Таким образом, под действием внешнего импульса H_2 – F_2 -лазера в среде HF– H_2 – F_2 – O_2 –He– F_2SO_3 образуется некоторая концентрация свободных атомов фтора N_a и происходит иницирование цепной реакции H_2 – F_2 . Если скорость образования свободных атомов в ходе энергетического разветвления цепи будет превышать скорость их потерь при столкновении с молекулами O_2 , то начнется самоускоряющийся процесс, сопровождающийся ростом концентрации активных центров и температуры газовой среды T .

В результате в некоторый момент времени скорость цепной реакции станет достаточной для начала генера-

ции лазерного излучения. В отсутствие в исходной лазерной смеси молекул F_2SO_3 удельный энергосъем данного лазера будет сравнительно небольшим (~ 10 Дж/л) [14]. В рассматриваемой же среде при достижении некоторой температуры T станет существенным процесс термической диссоциации молекул F_2SO_3 с образованием свободных атомов F ($\text{F}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{F} + \text{FSO}_3$), концентрация которых будет резко увеличиваться, что приведет через время t_1 после начала иницирования к генерации лазерного импульса с достаточно большой энергией и малой длительностью [15, 16]. В результате удельный энергосъем ε_L исследуемого лазера может значительно вырасти.

Для нахождения характеристик фторводородного лазера на термоцепной разветвленной реакции, иницируемой излучением H_2 – F_2 -лазера, нами были проведены численные расчеты на основе ранее разработанной модели при фиксированном вращательном квантовом числе генерируемого излучения [17]. При этом на начальном этапе иницирования решались уравнения, учитывающие резонансное возбуждения молекул HF внешним излучением фторводородного лазера:

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

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 $I_{v,j}$; $\nu_{v,j}$ – частота излучения; τ_j – характерное время вращательной релаксации [18, 19]; $M_j = [1/(2j+1)] \exp[j(j+1)Q/T]T/Q - 1$; Q – характеристическая вращательная температура молекулы HF.

В соответствии с экспериментальными данными в расчетах полагалось, что импульс иницирующего излучения на каждом переходе HF $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$, где $v = 1-6$, $j = 4-12$, имеет вид равнобедренного треугольника [14, 19]. При этом временная зависимость суммарной интенсивности иницирующего импульса была достаточно близка к экспериментально зафиксированной форме импульса излучения фторводородного лазера с длительностью импульса генерации 2 мкс [14]. Суммарная плотность энергии иницирующего излучения полагалась равной 1 Дж/см². Конкретные расчеты были проведены для смеси $\text{H}_2:\text{F}_2:\text{O}_2:\text{He} = X:400:40:Y$ мм рт. ст. ($T = 300$ К). Предполагалось, что в данной смеси находится легко диссоциирующая добавка F_2SO_3 с давлением 40 мм рт. ст. Общее давление смеси полагалось равным 781 мм рт. ст. Давления водорода и гелия варьировались, но их суммарное парциальное давление составляло 300 мм рт.ст. Считалось, что в исследуемой среде константа скорости диссоциации молекул F_2SO_3 $k_d = \exp(-16500 \text{ K}/T) \cdot 5 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ [16]. Начальное давление HF полагалось равным 1 мм рт. ст. Удельный энергосъем ε_L генерируемого в этой среде лазерного излучения рассчитывался при пороговом усилении резонатора 0.005 см^{-1} .

Результаты расчетов ε_L при разных давлениях водорода и гелия для вращательных чисел $J = 7$ и 12 представлены в табл.1. Видно, что при наличии в исходной смеси F_2SO_3 расчетный энергосъем лазера на термоцепном взрыве тем больше, чем меньше в смеси содержится He. Однако в экспериментах с фторводородным лазером

в смеси должно быть некоторое количества гелия, поэтому в дальнейшем мы будем подробно исследовать смесь $H_2:F_2:O_2:He = 200:400:40:100$ мм рт. ст., которая, с одной стороны, энергоемка, а с другой – достаточно реальна для эксперимента. Таким образом, удельный энергосъем генерируемого излучения фторводородного лазера на термоцепном взрыве в среде $HF-H_2-F_2-O_2-He-F_2SO_3$ при давлении 1 атм может превышать 200 Дж/л.

Табл.1.

[H_2] (мм рт. ст.)	[He] (мм рт. ст.)	N_a (10^{12} см^{-3})	ε_L (Дж/л) ($J = 7$)	ε_L (Дж/л) ($J = 12$)	t_1 (мкс)
50	250	3.9	–	11	40
100	200	4.1	65	101	39
150	150	3.8	123	165	42
200	100	3.4	162	204	46
250	50	3.1	184	225	51
300	0	2.8	194	235	58

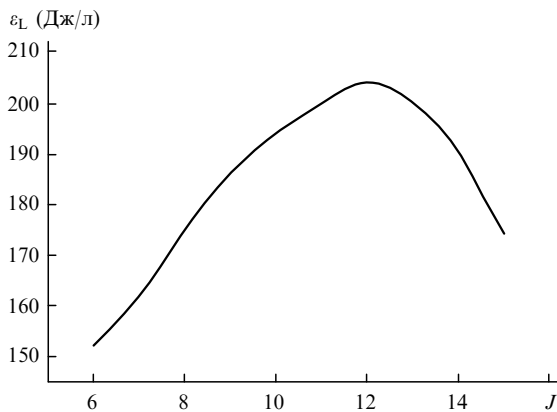


Рис. 1. Зависимость расчетного удельного энергосъема фторводородного лазера при термоцепном взрыве в смеси состава $H_2:F_2:O_2:He = 200:400:40:100$ мм рт. ст. от вращательного квантового числа J генерируемого излучения.

На рис.1 представлена зависимость расчетного удельного энергосъема от вращательного квантового числа J для выбранной смеси $H_2:F_2:O_2:He = 200:400:40:100$ мм рт.ст. Видно, что наибольший энергосъем (204 Дж/л) достигается при $J = 12$. При исследовании всех остальных смесей также было получено оптимальное вращательное

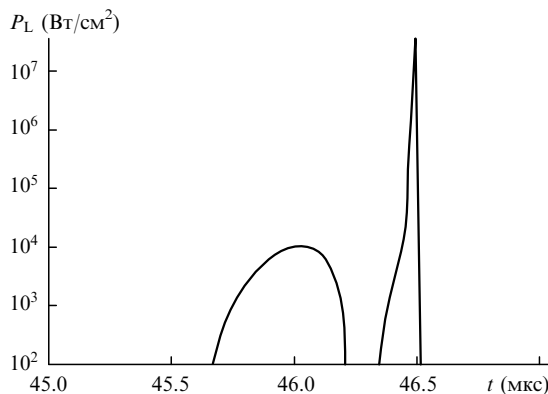


Рис.2. Временная зависимость плотности мощности генерируемого излучения фторводородного лазера на термоцепном взрыве в смеси состава $HF:H_2:F_2:O_2:He:F_2SO_3 = 1:200:400:40:100:40$ мм рт. ст.

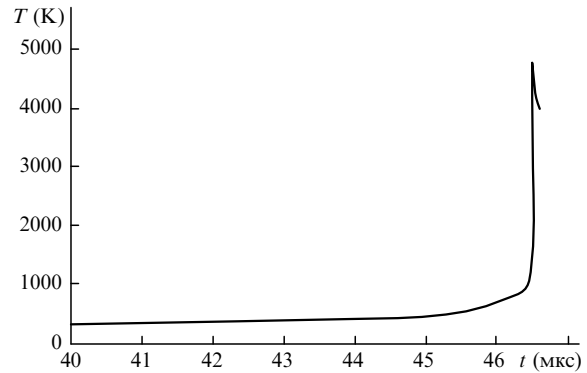


Рис.3. Временная зависимость температуры лазерной среды.

квантовое число $J = 12$. Это объясняется тем, что в условиях протекания термоцепного взрыва генерация происходит при высоких температурах (свыше 1000 К), а следовательно, при более высоких J (свыше 10).

На рис.2 представлена расчетная временная зависимость плотности мощности генерации фторводородного лазера на термоцепном взрыве в среде с исходным составом активной смеси $HF:H_2:F_2:O_2:He:F_2SO_3 = 1:200:400:40:100:40$ мм рт. ст. Как видно из рис.2, длительность импульса генерации, обусловленного термоцепным взрывом, весьма мала (~ 20 нс), и учет вращательной неравновесности при вычислении удельного лазерного энергосъема в этих условиях становится принципиальным. На рис.3 приведена временная зависимость температуры газовой среды. Существенный рост мощности генерируемого излучения в рассматриваемом варианте начинается при достижении температуры лазерной смеси 1200 – 1300 К.

Таким образом, в настоящей работе проведена оптимизация по составу смеси и вращательному квантовому числу генерируемого излучения фторводородного лазера при термоцепном взрыве, инициируемом многолинейчатым излучением фторводородного лазера при резонансно-колебательном возбуждении молекул HF. Показано, что энергосъем такого лазера на смеси с исходным составом $HF:H_2:F_2:O_2:He:F_2SO_3 = 1:200:400:40:100:40$ мм рт. ст., инициируемого импульсом излучения H_2-F_2 -лазера, достигает более 200 Дж/л при оптимальном вращательном числе 12. Важно, что основная часть энергии выделяется в очень коротком импульсе с длительностью порядка 10 нс. Такой режим представляет существенный интерес для плазменных исследований и технологии лазерно-ударного упрочнения сплавов. При этом для получения короткоимпульсного излучения не требуется дорогостоящей и громоздкой ускорительной аппаратуры.

1. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Шеглов В.А. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г. Басова (М., Наука, 1982).
2. Игошин В.И., Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **6**, 2517 (1979).
3. Басов Н.Г., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Панкратов А.В. *ДАН СССР*, **198**, 1043 (1971).
4. Басов Н.Г., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Панкратов А.В., Скачков А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, 251 (1971).
5. Акинфиев Н.Н., Басов Н.Г., Галочкин В.Т., Заворотный С.И., Маркин Е.П., Ораевский А.Н., Панкратов А.В. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, 745 (1974).
6. Галочкин В.Т., Заворотный С.И., Косинов В.Н., Овчинников А.А., Ораевский А.Н., Стародубцев Н.Ф. *Квантовая электроника*, **3**, 125 (1976).
7. Балькин В.И., Коломыйский Ю.Р., Туманов О.А. *Квантовая*

- электроника, **2**, 819 (1975).
8. Белоцерковец А.В., Кириллов Г.А., Кормер С.В., Кочемасов Г.Г., Куратов Ю.В., Машенджинов В.И., Савин Ю.В., Станкеев Э.А., Урлин В.Д. *Квантовая электроника*, **2**, 2412 (1975).
 9. Wood O.R., Silfvast W.T. *IEEE J.Quantum Electron.*, **15**, 1323 (1979).
 10. Chiu H.Y., Somers R.M., Benson R.C. *Chem.Phys.Letts*, **61**, 203 (1979).
 11. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **10**, 458 (1983).
 12. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **16**, 437 (1989).
 13. Азаров М.А., Дроздов В.А., Игошин В.И., Куров А.Ю., Петров А.Л., Пичугин С.Ю., Трощиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **24**, 983 (1997).
 14. Азаров М.А., Дроздов В.А., Игошин В.И., Катулин В.А., Куров А.Ю., Петров А.Л., Пичугин С.Ю., Трощиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **25**, 401 (1998).
 15. Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Стукалина И.Л. *Квантовая электроника*, **30**, 580 (2000).
 16. Байков Э.У., Башкин А.С., Ораевский А.Н. *Квантовая электроника*, **14**, 151 (1987).
 17. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **21**, 417 (1994).
 18. Башкин А.С., Курдоглыян М.С., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **194**, 49 (1989).
 19. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трощиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **29**, 21 (1999).