

Импульсный фторводородный усилитель, инициируемый входным лазерным излучением при колебательном возбуждении молекул HF

В.И.Игошин, С.Ю.Пичугин

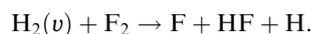
Проведено теоретическое моделирование H_2 - F_2 -усилителя, инициирование которого осуществляется резонансным колебательным возбуждением молекул HF излучением импульсного фторводородного лазера. Численные расчеты выполнены с учетом неоднородности начальной концентрации фтористого водорода, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси в экспериментах. Расчетный энергосъем для смеси $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$ Тор составляет 10–20 Дж/л при среднем вдоль оси усилителя начальном давлении HF, равном 0.1–0.5 Тор, а коэффициент усиления по энергии лазерного излучения на длине 4 м достигает 5–10.

Ключевые слова: H_2 - F_2 -усилитель, резонансное колебательное возбуждение молекул, инициирование ИК лазерным излучением.

Одним из возможных подходов к проблеме создания химического фторводородного лазера, инициируемого собственным излучением и не потребляющего энергию других внешних источников, является резонансное колебательное возбуждение молекул HF с последующей передачей колебательной энергии молекулам H_2 [1, 2]. Далее колебательно-возбужденные молекулы H_2 вступают в реакцию с F_2 с образованием свободных атомов (энергетическое разветвление цепи). В работе [3] рассчитаны лазерные характеристики в условиях развития генерации за счет энергетического разветвления цепи в смеси HF – H_2 – O_2 – He, инициируемой ИК лазерным излучением. В этой работе впервые экспериментально инициирована цепная реакция в данной смеси излучением фторводородного лазера. В то же время в экспериментах [3] лазерная генерация не была достигнута. Основной причиной этого, на наш взгляд, явилась невозможность получения достаточно однородного по объему состава рабочей смеси в экспериментах. Напуск водорода в смесь F_2 – O_2 – He проводился в последнюю очередь через отверстия, размещенные с периодом ~ 10 см. Это привело к неоднородности образования HF по длине реактора. Целью настоящей работы является теоретическое исследование H_2 – F_2 -усилителя, в котором резонансное возбуждение молекул HF при инициировании осуществляется импульсным фторводородным лазером в условиях отмеченной неоднородности рабочей смеси.

Рассмотрим среду HF – H_2 – F_2 – O_2 – He, на которую действует импульс излучения фторводородного лазера. Молекулы HF резонансно поглощают излучение входного импульса с образованием колебательно-возбужденных молекул HF(ν) (ν – номер колебательного уровня). Молекулы HF(ν) передают колебательную

энергию молекулам водорода, и возникающие колебательно-возбужденные молекулы $H_2(\nu)$ вступают в реакцию с F_2 с образованием свободных атомов,



Таким образом, под действием импульса HF-лазера в среде H_2 – F_2 – O_2 – He образуется некоторая концентрация свободных атомов N_a и происходит инициирование цепной реакции $H_2 + F_2$.

В ходе этой реакции образуются колебательно-возбужденные молекулы HF(ν) ($\nu = 1 - 9$), что опять же приводит к возникновению дополнительных свободных атомов (энергетическое разветвление цепи). Если скорость образования активных центров в ходе энергетического разветвления будет превышать скорость их потерь в реакциях обрыва цепи при столкновении с молекулами кислорода, то начнется самоускоряющийся процесс, сопровождающийся ростом N_a , температуры газовой среды T и концентрации колебательно-возбужденных молекул HF.

Спустя некоторое время после прохождения через среду инициирующего импульса излучения HF-лазера в ней создаются условия для эффективного усиления излучения, обусловленного колебательно-вращательными переходами молекул фтористого водорода. Это может быть либо излучение HF-лазера, либо часть спонтанного излучения колебательно-возбужденных молекул HF, которая распространяется вдоль оси усилителя в направлении распространения инициирующего импульса. В результате в рассматриваемой среде будет распространяться импульс излучения, все более усиливаясь с увеличением расстояния от входа в усилитель, на частоте переходов молекул HF.

Для нахождения характеристик фторводородного усилителя, инициируемого излучением HF-лазера, нами были проведены численные расчеты на основе ранее разработанной многоуровневой модели с учетом вращательной неравновесности [4]. В этой модели для коэффициентов усиления α_ν на переходах $(\nu, j - 1) \rightarrow (\nu - 1, j)$

В.И.Игошин, С.Ю.Пичугин. Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; web-site: www.fian.smr.ru; e-mail: theor@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 8 апреля 2003 г., после доработки – 22 октября 2003 г.

молекул HF ($v = 1, 2, \dots, R$) имеем

$$\alpha_R = hv_R \left(\frac{n_R}{M_{j-1}\tau} - \frac{2j-1}{2j+1} \frac{n_{R-1}}{M_j\tau} \right) \frac{1}{I_R + I_R^s},$$

$$\alpha_{R-1} = \left[\frac{v_{R-1}}{v_R} \alpha_R I_R + hv_{R-1} \left(\frac{n_{R-1}}{M_{j-1}\tau} - \frac{2j-1}{2j+1} \frac{n_{R-2}}{M_j\tau} \right) \right] \times \frac{1}{I_{R-1} + I_{R-1}^s},$$

.....

$$\alpha_1 = \frac{2j+1}{4j} \left[\frac{v_1}{v_2} \alpha_2 I_2 + hv_1 \left(\frac{n_1}{M_{j-1}\tau} - \frac{2j-1}{2j+1} \frac{n_0}{M_j\tau} \right) \right] \frac{1}{I_1 + I_1^s},$$

где I_v – интенсивность излучения с частотой ν_v , отвечающей переходу $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$; I_v^s – соответствующая интенсивность насыщения [4]; n_v – населенность v -го колебательного уровня HF; τ – характерное время вращательной релаксации; $M_j = [1/(2j+1)] \exp[j(j+1)Q/T] \times T/Q - 1$; Q – характеристическая вращательная температура молекулы HF. Изменение интенсивности излучения I_v при его распространении в направлении оси x в среде усилителя описывается уравнением переноса излучения

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_v}{\partial t} + \frac{\partial I_v}{\partial x} = \alpha_v I_v. \tag{2}$$

Учитываемые нами процессы химической и колебательной кинетики в среде $H_2 - F_2$ -лазера и используемые в расчетах константы скоростей процессов приведены в [5]. При численном расчете характеристик фторводородного усилителя решались уравнения для населенностей n_v колебательных уровней молекул HF ($v=0, 1, \dots, 7$), уравнения химической кинетики, уравнения для среднего запаса колебательных квантов H_2 и температуры газовой среды. В расчетах полагалось, что характерное время вращательной релаксации $\tau = 1/(\pi\Delta\nu_L)$, где $\Delta\nu_L$ – однородная полуширина линии HF. В расчетах также предполагалось, что усиление будет проходить одновременно на переходах молекул HF $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$ с $v=1, 2, \dots, 6$. Изменение соответствующих интенсивностей излучения при его распространении в направлении оси x в среде $H_2 - F_2$ -усилителя будет описываться уравнениями (2). Задавая значения интенсивностей $I_v(t)$ усиляемого излучения на входе в среду усилителя ($x=0$), в итоге находим интенсивности излучения на каждом переходе $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$ в произвольной точке x . Удельный энергосъем на расстоянии x от входа излучения в среду усилителя определяется выражением

$$\mathcal{E}(x) = \sum_{v=1}^6 \int \alpha_v(x, t) I_v(x, t) dt.$$

Нами выполнены численные расчеты с учетом неоднородности начальной концентрации HF по пространству, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси. Временная зависимость суммарной интенсивности I_{in} входного лазерного импульса полагалась равной экспериментально зафиксированной для импульса излучения $H_2 - F_2$ -лазера с длительностью 2 мкс [3], а при $t > 2$ мкс считалось, что $I_{in} = 1$ Вт/см². В соответствии с экспериментальными спектральными и

энергетическими характеристиками импульса излучения $H_2 - F_2$ -лазера в расчетах предполагалось, что в этом импульсе присутствует излучение шести колебательных полос HF на переходах $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$, где $v=1-6, j=7$ [6]. Расчеты были проведены для энергоемкой смеси $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$ Тор. Изменение начального парциального давления HF в смеси в зависимости от расстояния вдоль оси x описывалось выражением $p_{HF} = p_0 + C \sin(2\pi x/d)$, где C – амплитуда отклонения p_{HF} от среднего значения, d – период неоднородности давления HF вдоль оси усилителя. Отметим, что в результате численных расчетов находятся локальные (не усредненные по периодам неоднородности d) параметры исследуемого усилителя, в частности зависимость удельного лазерного энергосъема \mathcal{E} от x при различных p_0, C и плотности энергии входного инициирующего импульса $E_{in} = E(x=0)$.

В табл.1 представлены расчетные плотность энергии выходного лазерного импульса $E_{out} = E(x=L)$ и коэффициент усиления по энергии $K = E_{out}/E_{in}$ при различных значениях p_0 и E_{in} для длины усилителя $L = 4$ м. Вычисления были проведены при сравнительно небольшом отклонении парциального давления HF от среднего значения ($C/p_0 = 5\%$) с периодом $d = 20$ см. Заметим, что расчеты для $d = 10$ см приводят практически к тем же результатам. Максимально достижимое значение коэффициента усиления по энергии лазерного излучения растет с уменьшением начального давления HF в смеси и достигает 5 при $p_0 = 0.1$ Тор (см. табл.1). Это обусловлено снижением потерь лазерного излучения в среде фторводородного усилителя с уменьшением p_{HF} , что ведет прежде всего к снижению плотности энергии E_{in} , необходимой для эффективного усиления излучения на переходах HF. Отметим, что уменьшение давления кислорода в смеси также приводит к увеличению расчетных значений K . Например, при давлении O_2 , равном 10 Тор, коэффициент усиления по энергии для длины усилителя 4 м достигает 10. Временная форма выходного лазерного импульса, рассчитанная для $p_0 = 0.25$ Тор и $E_{in} = 2$ Дж/см², представлена на рис.1. Видно, что на выходе исследуемого $H_2 - F_2$ -усилителя будет наблюдаться вначале немного ослабленный инициирующий импульс, а затем с задержкой около 20 мкс – усиленный импульс излучения HF-лазера.

Далее в расчетах с целью определения допустимой неоднородности HF в среде исследуемого усилителя варьировалась амплитуда отклонения начального давления фтористого водорода от среднего значения. Зависи-

Табл.1.

p_0 (Тор)	E_{in} (Дж/см ²)	E_{out} (Дж/см ²)	K
0.1	0.25	0.75	3
	0.5	2.5	5
	1	4.7	4.7
	2	6.8	3.4
0.25	0.5	0.65	1.3
	1	2.5	2.5
	2	5.4	2.7
	3	7.3	2.4
0.5	1	1.1	1.1
	2	3.4	1.7
	3	5.7	1.9
	4	7.4	1.85

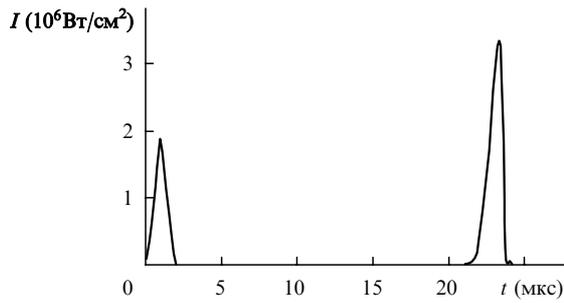


Рис.1. Расчетная временная зависимость суммарной интенсивности I лазерного излучения на выходе из усилителя при $p_0 = 0.25$ Тор и $E_{in} = 2$ Дж/см² ($C/p_0 = 5\%$).

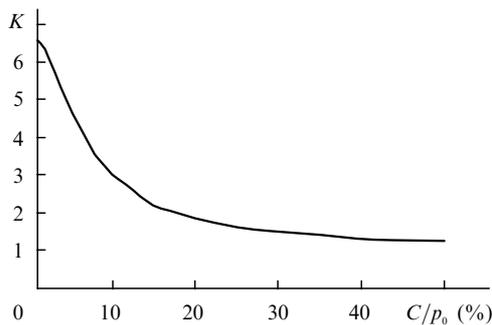


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления по энергии от параметра C/p_0 для $p_0 = 0.1$ Тор и $E_{in} = 1$ Дж/см².

мость коэффициента усиления по энергии лазерного излучения от параметра C/p_0 для $p_0 = 0.1$ Тор и $E_{in} = 1$ Дж/см² приведена на рис.2. Эта зависимость, а также расчеты для других вариантов показывают, что эффективное усиление входного лазерного излучения возможно при $C/p_0 < 20\%$. На рис.3 представлены расчетные зависимости удельного энергосъема от x для $C/p_0 = 5\%$ и 50% ($d = 20$ см). Осцилляции в энергосъеме вызваны неодородностью начальной концентрации HF вдоль оси x . Отрицательные значения энергосъема соответствуют преобладанию отрицательного коэффициента усиления,

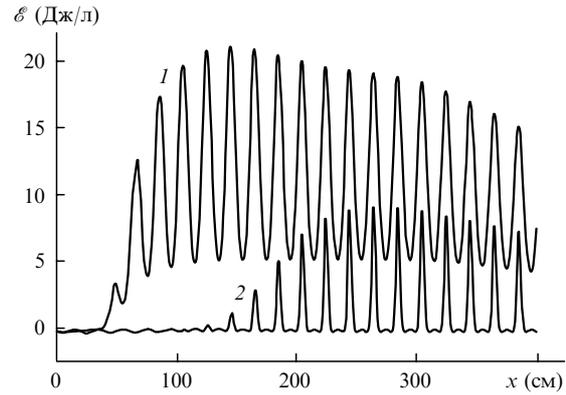


Рис.3. Расчетные зависимости удельного энергосъема от x для $C/p_0 = 5\%$ (1) и 50% (2) при $p_0 = 0.1$ Тор и $E_{in} = 1$ Дж/см².

т. е. поглощению лазерного излучения. Среднее значение расчетного энергосъема при $C/p_0 = 5\%$ составляет около 10 Дж/л при $x > 100$ см, а при 50% – 3 Дж/л, причем только для $x > 200$ см.

Таким образом, в настоящей работе проведено численное исследование импульсного химического фторводородного усилителя, инициируемого входным излучением. Показано, что кинетическая схема инициирования $\text{H}_2 - \text{F}_2$ -лазера через резонансное колебательное возбуждение молекул HF может обеспечить существенное усиление по энергии лазерного излучения без внешних источников энергии.

1. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. *Химические лазеры* (М.: Наука, 1982, с. 182).
2. Башкин А.С., Курдоглян М.С., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **194**, 45 (1989).
3. 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).
4. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **23**, 326 (1996).
5. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **21**, 417 (1994).
6. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **29**, 21 (1999).