

УДК 621.373.826.038.823

ХИМИЧЕСКИЙ HF-УСИЛИТЕЛЬ, ИНИЦИИРУЕМЫЙ ВХОДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2003 В.И. Игошин, С.Ю. Пичугин

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Теоретически исследуется $H_2 - F_2$ -усилитель, инициируемый через резонансное колебательное возбуждение молекул HF излучением импульсного фторводородного лазера. Выполнены численные расчеты с учетом неоднородности начальной концентрации HF, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси в экспериментах. Среднее значение расчетного энергосъема для смеси $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$ мм.рт.ст. составляет около 10 Дж/л при среднем вдоль оси усилителя начальном давлении HF 0,1-0,5 мм рт.ст., а коэффициент усиления по энергии лазерного излучения для длины усилителя 4 м достигает значений 5-10.

В настоящей работе теоретически исследуется $H_2 - F_2$ -усилитель, инициируемый через резонансное возбуждение молекул HF излучением импульсного фторводородного лазера с последующей передачей колебательной энергии от этих молекул молекулам H_2 [1]. На основе данного механизма инициирования возможно создание чисто химического усилителя лазерного излучения, не потребляющего энергию внешних источников.

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(v) (v – номер колебательного уровня). Молекулы HF(v) передают колебательную энергию молекулам водорода и возникающие колебательно возбужденные молекулы $H_2(v)$ вступают в реакцию с F_2 с образованием свободных атомов: $H_2(v) + F_2 \rightarrow F + HF + H$. Таким образом, под действием входного 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(v) (v = 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 ско-

рость 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. Поэтому через некоторое время после прохождения через среду инициирующего импульса излучения HF-лазера в ней создаются условия для эффективного усиления излучения на колебательно-вращательных переходах молекул фтористого водорода. Это может быть либо излучение HF-лазера, либо спонтанное излучение колебательно возбужденных молекул HF в направлении распространения инициирующего импульса. В результате в рассматриваемой среде будет распространяться импульс излучения HF-лазера, все более усиливаясь с увеличением расстояния от входа в усилитель.

Для нахождения характеристик фторводородного усилителя, инициируемого излучением HF-лазера, нами были проведены численные расчеты на основе ранее разработанной многоуровневой модели с учетом вращательной неравновесности [2]. В этой модели имеем следующие выражения для коэффициентов усиления α_v на переходах (v, j-1) \rightarrow (v-1, j) (v=1,2...R) молекул HF:

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

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

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

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

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

Учитываемые нами процессы химической и колебательной кинетики в среде $H_2 - F_2$ -лазера и используемые в расчетах константы скоростей процессов приведены в [3]. 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. Характерное время вращательной релаксации полагалось в расчетах равным $\tau = 1/(\pi \Delta \nu_L)$, где $\Delta \nu_L$ однородная полуширина линии HF. В расчетах 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 лазерного излучения при его распространении в направлении

оси X в среде $H_2 - F_2$ -усилителя будет описываться уравнениями (2) с учетом (1). Задавая значения интенсивностей $I_v(t)$ усиливаемого излучения на входе в среду усилителя ($x = 0$), в итоге находятся значения интенсивностей лазерного излучения на каждом переходе $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$ в произвольной точке x . Удельный энергосъем в на расстоянии x от входа излучения в среду усилителя определяется

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

Нами выполнены численные расчеты с учетом неоднородности начальной концентрации HF по пространству, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси. Например, в экспериментах [1] напуск водорода производился последним в смесь $F_2 - O_2 - He$ через последовательность отверстий размещенных с периодом ≈ 10 см. Это приводило к неоднородности образования HF по длине реактора. Временная зависимость суммарной интенсивности инициирующего импульса полагалась равной экспериментальной зафиксированной для импульса излучения $H_2 - F_2$ -генератора с длительностью 2 мкс [1]. В соответствии с экспериментальными спектральными и энергетическими характеристиками импульса излучения $H_2 - F_2$ -генератора в расчетах предполагалось, что в этом импульсе присутствует излучение шести колебательных полос HF на переходах $(v, j-1) \rightarrow (v-1, j)$, где $v = 1 - 6$, $j = 7$ [4]. Расчеты были проведены для энергоемкой смеси $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$ мм рт.ст. Изменение начального парциального давления HF в смеси в зависимости от расстояния 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. В результате были получены зависимости удельного лазерного энергосъема ε от x при различных значениях p_0 , C и плотности энергии входного инициирующего импульса $E_{in} = E(x=0)$.

В таблице представлены результаты расчетов плотности энергии выходного лазерного импульса $E_{out} = E(x=L)$ и коэффициента усиления по энергии $K = E_{out}/E_{in}$ при различ-

Таблица. Результаты расчетов плотности энергии выходного лазерного импульса $E_{out} = E(x=L)$ и коэффициента усиления по энергии $K = E_{out}/E_{in}$

p_0 , мм рт.ст.	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

ных 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 величины периода неоднородности $p_{HF} d = 10$ см приводят практически к тем же результатам. Как видно из таблицы максимально достижимое значение коэффициента усиления по энергии лазерного излучения растет с уменьшением начального давления HF в смеси и достигает 5 при $p_0 = 0,1$ мм рт.ст. Это обусловлено снижением ослабления иницирующего 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 10 мм рт.ст. коэффициент усиления по энергии для длины усилителя 4 м достигает 10.

На рис. 1 представлены временные зависимости интенсивности усиливающегося лазерного излучения на различных расстояниях от входа в среду исследуемого усилителя, рассчитанные при $p_0 = 0,1$ мм рт.ст. и $E_{in} = 1$ Дж/см². Видно, что в данном случае импульс излучения распространяется в среде $H_2 - F_2$ -усилителя, усиливаясь с расстоянием x с за-

держкой по времени около 35 мкс после иницирующего импульса.

Далее в расчетах варьировалась величина амплитуды отклонения начального давления фтористого водорода от среднего значения с целью определения допустимой неоднородности HF в среде исследуемого усилителя. Зависимость коэффициента усиления по энергии лазерного излучения от значения C/p_0 для $p_0 = 0,1$ мм рт.ст. и $E_{in} = 1$ Дж/см² приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что эффективное усиление входного лазерного излучения возможно при $C/p_0 < 20\%$. На рис. 3 представлены зависимости расчетного удельного энергосъема от x при $p_0 = 0,1$ мм рт.ст., $E_1 = 1$ Дж/

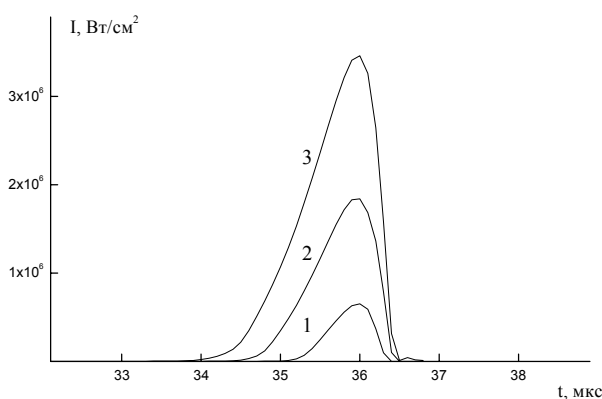


Рис.1. Расчетные зависимости от времени интенсивности I усиливающегося лазерного излучения на расстоянии 1 м (кривая 1), 2 м (2) и 4 м (3) от входа в среду $H_2 - F_2$ -усилителя

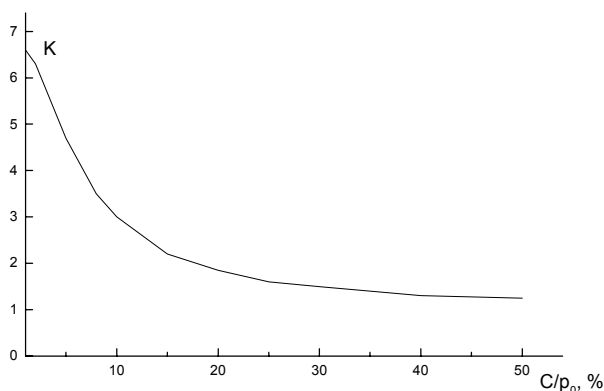


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления по энергии лазерного излучения от относительного отклонения давления HF от среднего значения для $p_0 = 0,1$ мм рт.ст. и $E_{in} = 1$ Дж/см²

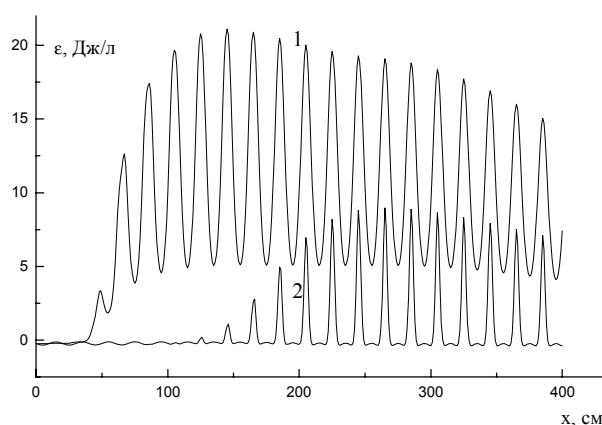


Рис.3. Зависимость расчетного удельного энергосъема $H_2 - F_2$ -усилителя от расстояния x при $p_0 = 0,1$ мм рт.ст. и $E_{in} = 1$ Дж/см² для $C/p_0 = 5\%$ (кривая 1) и $C/p_0 = 50\%$ (2)

см² для $C/p_0 = 5\%$ и $C/p_0 = 50\%$ ($d = 20$ см). Осцилляции в энергосъеме вызваны неодородностью начальной концентрации HF вдоль оси X. Отрицательные значения энергосъема соответствуют преобладанию отрицательного коэффициента усиления, то есть поглощению лазерного излучения. Как видно, среднее значение расчетного энергосъема в первом случае составляет около 10 Дж/л при $x > 100$ см, а во втором - 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 $H_2 - F_2$ -лазера через резонансное колебательное возбуждение молекул HF может обеспечить существенное усиление по энергии лазерного излучения без внешних источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров М.А., Дроздов В.А., Игошин В.И., Катулин В.А., Куров А.Ю., Петров А.Л., Пичугин С.Ю., Трощиненко Г.А. Колебательное возбуждение молекул HF и инициирование $H_2 - F_2$ -генератора многолинейчатый излучением фторводородного лазера // Квантовая электроника. 1998. №5.
2. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. Новые динамические режимы фотонного разветвления в химических HF-лазерах на двухфазной активной среде // Квантовая электроника. 1996. №4.
3. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. Многоуровневая модель импульсного химического $H_2 - F_2$ -лазера и перспективные режимы его работы // Квантовая электроника. 1994. №5.
4. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трощиненко Г.А. Спектрально-энергетические характеристики импульсного фторводородного лазера и вращательная релаксация молекул HF // Квантовая электроника. 1999. №1.

CHEMICAL HF AMPLIFIER INITIATED BY INPUT LASER RADIATION

© 2003 V.I. Igoshin, S.Yu. Pichugin

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

An $H_2 - F_2$ amplifier initiated by radiation from a pulsed hydrogen fluoride laser is studied theoretically. Numerical calculations are made by taking into account the inhomogeneity of the initial HF concentration appearing upon preparation of the laser mixture in experiments. The mean theoretical specific energy for the $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$ Torr mixture is about 10 J L^{-1} for an average initial pressure of HF 0,1-0,5 Torr and the maximal energy gain is equal 5-10 for an amplification length 4 m.