

## $H_2 - F_2$ -усилитель, инициируемый ИК лазерным излучением в условиях неоднородности рабочей смеси

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

*Теоретически исследуется  $H_2 - F_2$ -усилитель, работа которого инициируется излучением импульсного фторводородного лазера. Выполнены численные расчеты с учетом неоднородности начальной концентрации HF, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси в экспериментах. Средний расчетный энергопотребление для смеси состава  $H_2:F_2:O_2:He = 100:600:30:100$  мм рт. ст. составляет около 15 Дж/л при среднем вдоль оси усилителя начальном давлении фторводорода 0.5 мм рт. ст. Результаты расчетов позволяют заключить, что при достижении в экспериментах достаточной однородности среды возможно получение лазерного эффекта на основе предложенной кинетической схемы инициирования  $H_2 - F_2$ -лазера.*

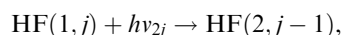
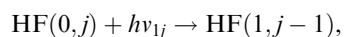
**Ключевые слова:**  $H_2 - F_2$ -усилитель, резонансное колебательное возбуждение молекул, инициирование цепной реакции.

Один из возможных подходов к проблеме создания химического лазера, инициируемого собственным излучением и не потребляющего энергию других внешних источников, апробирован нами с соавторами в работе [1]. В этой работе рассчитаны лазерные характеристики в условиях развития генерации за счет энергетического разветвления инициируемой ИК лазерным излучением цепной реакции в смеси  $HF - H_2 - F_2 - O_2 - He$ . Впервые экспериментально цепная реакция в смеси  $H_2 - F_2 - O_2 - He$  была инициирована излучением фторводородного лазера. Проведенное сравнение экспериментально и теоретически полученных времен развития генерации обнаружило удовлетворительную корреляцию расчетных и измеренных времен развития цепной реакции. Однако в экспериментах [1] не была получена лазерная генерация. Основной причиной этого, на наш взгляд, являлось то, что в экспериментах использовался недостаточно однородный по объему состав рабочей смеси. Последним в смесь  $H_2 - F_2 - O_2 - He$  поступал водород через ряд отверстий, размещенных с периодом  $\sim 5$  см. Это приводило к неоднородности образования HF по длине реактора. Целью настоящей работы является расчет процесса развития лазерного излучения и достижимых лазерных характеристик в условиях неоднородности рабочей смеси, а также получение количественного критерия, определяющего допустимую степень неоднородности HF.

Исследуем  $H_2 - F_2$ -усилитель, инициирование которого осуществляется через резонансное возбуждение молекул HF излучением импульсного фторводородного лазера с последующей передачей колебательной энергии от этих молекул молекулам  $H_2$ . Колебательно-возбужденные молекулы  $H_2$  вступают в реакцию с молекулами  $F_2$  с образованием свободных атомов. Расчет лазерных характеристик проведем в условиях усиления за счет

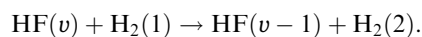
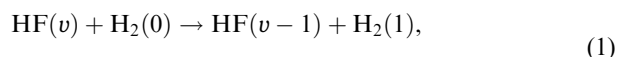
энергетического разветвления цепной реакции в смеси  $HF - H_2 - F_2 - O_2 - He$  для инициирующего импульса, спектральный состав и энергетические характеристики которого соответствуют экспериментальным данным для излучения  $H_2 - F_2$ -лазера [1].

Рассмотрим среду  $HF - H_2 - F_2 - O_2 - He$ , на которую действует импульс многолинейчатого излучения  $H_2 - F_2$ -лазера с длительностью  $t_{in}$ . Молекулы фтористого водорода резонансно поглощают излучение каждой линии входного импульса с образованием колебательно-возбужденных молекул  $HF(v)$  ( $v$  – номер колебательного уровня):

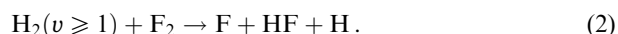


.....

Здесь  $j$  – вращательное квантовое число;  $\nu_{vj}$  – частота излучения  $P$ -линии входного импульса на переходе  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$ . Молекулы  $HF(v)$  передают колебательную энергию молекулам водорода:



Возникающие колебательно-возбужденные молекулы  $H_2$  вступают в реакцию с молекулами  $F_2$ , образуя свободные атомы:



Таким образом, под действием внешнего импульса  $H_2 - F_2$ -лазера в среде  $H_2 - F_2 - O_2 - He$  образуется некоторое количество свободных атомов с концентрацией  $N_a(t_{in})$  и происходит инициирование цепной реакции между  $H_2$  и  $F_2$ . В ходе этой реакции образуются колебательно-возбужденные молекулы  $HF(v)$  ( $v = 1 - 9$ ), а процессы (1), (2) приводят к возникновению дополнительных сво-

бодных атомов (энергетическое разветвление цепи). Если скорость образования активных центров в процессе энергетического разветвления цепи будет превышать скорость их потерь в реакциях обрыва цепи при столкновении с молекулами кислорода, то начнется самоускоряющийся процесс, сопровождающийся ростом  $N_a$  и температуры газовой среды  $T$ .

В результате в некоторый момент времени  $t_1$  скорость цепной реакции станет достаточной для эффективного усиления лазерного излучения, поэтому через некоторое время после прохождения через среду иницирующего импульса излучения HF-лазера в ней будет происходить усиление излучения на колебательно-вращательных переходах молекул HF. Это может быть либо слабое излучение непрерывного HF-лазера, которое действует на исследуемую среду в течение времени  $t > t_1$ , либо спонтанное излучение колебательно-возбужденных молекул HF в направлении распространения иницирующего импульса. Таким образом, в рассматриваемой среде будет распространяться импульс излучения HF-лазера, все более усиливающийся с увеличением расстояния от входа в усилитель.

Для нахождения характеристик фторводородного усилителя, иницируемого излучением  $H_2 - F_2$ -лазера, нами были проведены численные расчеты на основе ранее разработанной модели [2]. В этой модели коэффициенты усиления  $\alpha_v$  ( $v = 1, 2, \dots, 6$ ) на переходах  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$  молекул HF имеют вид

$$\alpha_6 = hv_6 \left( \frac{n_6}{M_{j-1}\tau} - \frac{2j-1}{2j+1} \frac{n_5}{M_j\tau} \right) \frac{1}{I_6 + I_6^s},$$

$$\alpha_5 = \left[ \frac{v_5}{v_6} \alpha_6 I_6 + hv_5 \left( \frac{n_5}{M_{j-1}\tau} - \frac{2j-1}{2j+1} \frac{n_4}{M_j\tau} \right) \right] \frac{1}{I_5 + I_5^s},$$

..... (3)

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

Здесь  $I_v$  – интенсивность излучения с частотой  $\nu_v$  на переходе  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$ ;  $I_v^s$  – соответствующая интенсивность насыщения;  $n_v$  – суммарная населенность  $v$ -го колебательного уровня HF;  $\tau$  – время вращательной релаксации в модели вращательного резервуара [3];  $M_j = [1/(2j + 1)](T/Q) \exp[j(j + 1)Q/T] - 1$ ;  $Q$  – 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

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_v}{\partial t} + \frac{\partial I_v}{\partial x} = \alpha_v I_v. \quad (4)$$

Учитываемые нами процессы химической и колебательной кинетики в среде  $H_2 - F_2$ -лазера и используемые в расчетах константы скоростей процессов приведены в [2]. При численном расчете характеристик фторводородного усилителя решались уравнения для населенностей  $n_v$  колебательных уровней молекулы HF ( $v = 0, 1, \dots, 7$ ), уравнения химической кинетики, уравнения для среднего числа колебательных квантов  $H_2$  и температуры газовой среды. Полагалось, что время вращательной ре-

лаксации  $\tau = 1/(\pi\Delta\nu_L)$ , где  $\Delta\nu_L$  – однородная полуширина линии HF, а усиление будет происходить одновременно на нескольких переходах молекулы HF:  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$ , где  $v = 1, 2, \dots, 6$ . Изменение соответствующих интенсивностей лазерного излучения при его распространении в направлении оси  $x$  в среде  $H_2 - F_2$ -усилителя будет описываться уравнениями (4). Задавая интенсивности  $I_v(t)$  усиливаемого излучения на входе в среду усилителя ( $x = 0$ ), можно найти интенсивности лазерного излучения на каждом переходе  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$  в произвольной точке  $x$ . Удельный энергосъем в  $v$ -й полосе на расстоянии  $x$  от входа излучения в среду усилителя определяется выражением  $\epsilon_v(x) = \int \alpha_v(x, t) I_v(x, t) dt$ .

Нами выполнены численные расчеты с учетом пространственной неоднородности начальной концентрации HF, возникающей из-за особенностей приготовления лазерной смеси в экспериментах. Временная зависимость суммарной интенсивности иницирующего импульса полагалась идентичной экспериментальной зависимости, зафиксированной для импульса излучения  $H_2 - F_2$ -лазера с длительностью 2 мкс [1, 4]. В соответствии с экспериментальными спектральными и энергетическими характеристиками импульса излучения  $H_2 - F_2$ -лазера предполагалось, что в этом импульсе присутствует излучение шести колебательных полос HF на переходах  $(v, j - 1) \rightarrow (v - 1, j)$  при  $j = 7$ . Суммарная плотность энергии иницирующего излучения считалась равной 10 Дж/см<sup>2</sup>. В результате расчетов получена зависимость удельного энергосъема  $\epsilon$  от  $x$  для смеси состава  $H_2 : F_2 : O_2 : He = 76 : 228 : 23 : 578$  мм рт. ст., используемой в экспериментах [1], и смеси состава  $H_2 : F_2 : O_2 : He = 700 : 600 : 30 : 100$  мм рт. ст.

Зависимость начального парциального давления фторводорода  $p_{HF}$  (в мм рт. ст.) в смеси от расстояния  $x$  (в см) описывалась выражением  $p_{HF} = 0.5 + C \sin(\pi x/10)$ , где  $C$  – амплитуда отклонения давления  $p_{HF}$  от среднего значения. В расчетах варьировалась величина  $C$  с целью определения допустимой неоднородности HF в среде исследуемого усилителя. Зависимость минимального ( $\epsilon_{\min}$ ) и максимального ( $\epsilon_{\max}$ ) расчетного удельного энергосъема от величины  $C$  для смеси  $H_2 : F_2 : O_2 : He = 76 : 228 : 23 : 578$  мм рт. ст. при  $x \approx 400$  см представлена в табл.1. Отрицательные значения энергосъема соответствуют поглощению лазерного излучения. Из табл.1 видно, что эффективное усиление входного лазерного излучения возможно при  $C \leq 0.1$  мм рт. ст. Для смеси  $H_2 : F_2 : O_2 : He = 100 : 600 : 30 : 100$  мм рт. ст. это условие было таким же. Полученные результаты, возможно, объясняют отсутствие лазерного эффекта в экспериментах по иницированию смеси состава  $H_2 : F_2 : O_2 : He = 76 : 228 : 23 : 578$  мм рт. ст. излучением  $H_2 - F_2$ -лазера.

На рис.1 даны зависимости расчетного удельного энергосъема и плотности энергии лазерного излучения

Табл.1.

$C$ (мм рт. ст.)	$\epsilon_{\min}$ (Дж/л)	$\epsilon_{\max}$ (Дж/л)
0.04	-0.1	1.5
0.05	-0.3	1.2
0.06	-0.5	0.85
0.1	-0.7	0.01
0.15	-0.8	-0.6
0.2	-0.9	-0.7

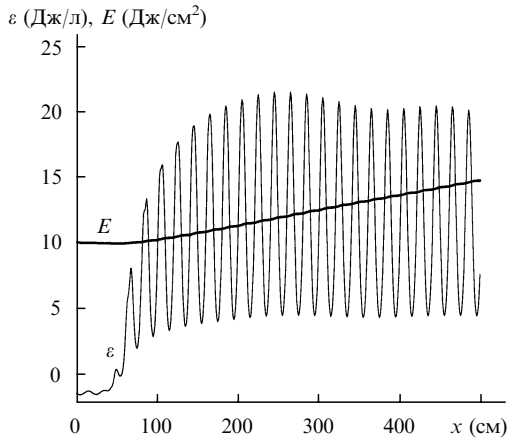


Рис.1. Зависимости расчетного удельного энергосъема  $\varepsilon$  и плотности энергии лазерного излучения  $E$  от  $x$  для смеси H<sub>2</sub>:F<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:He = 100:600:30:100 мм рт. ст. при  $C = 0.05$  мм рт. ст.

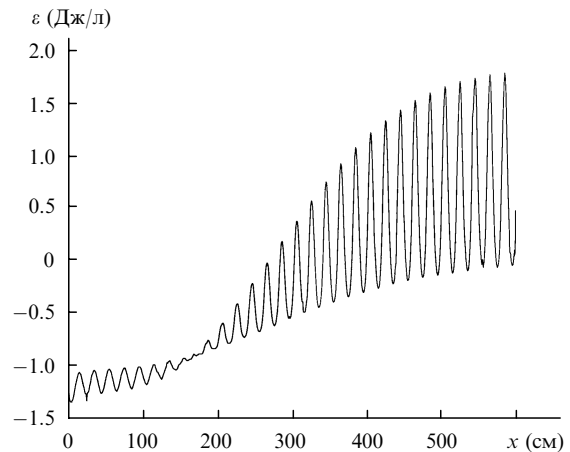


Рис.2. Зависимость расчетного удельного энергосъема  $\varepsilon$  от  $x$  для смеси H<sub>2</sub>:F<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:He = 76:228:23:578 мм рт.ст. при  $C = 0.05$  мм рт. ст.

(включая инициирующее) от  $x$  для смеси H<sub>2</sub>:F<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:He = 700:600:30:100 мм рт. ст. при  $C = 0.05$  мм рт. ст. Видно, что средний энергосъем для такой обогащенной смеси составляет около 15 Дж/л при  $x > 100$  см, а это уже представляет практический интерес. Осцилляции энергосъема вызваны неоднородностью концентрации HF вдоль оси  $x$ . В рассчитанном варианте усилителя, работающего в одностороннем режиме, коэффициент усиления по энергии (отношение энергий выходного и инициирующего лазерного излучения) при длине усилителя 4–5 м равен 1.3–1.5. Коэффициент же усиления по поглощенной в среде энергии инициирующего излучения значительно больше. Он может быть реализован в схеме регенеративного усилителя, где почти вся введенная энергия остается в активной среде. Согласно расчетам в таком усилителе коэффициент усиления может достигать 40–50 [5].

Основной же целью настоящей работы являлась интерпретация результатов экспериментов [1] и выяснение причин отсутствия в них генерации лазерного излучения. На рис.2 приведена зависимость удельного энергосъема

от  $x$  для экспериментальной смеси H<sub>2</sub>:F<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:He = 76:228:23:578 мм рт. ст. при  $C = 0.05$  мм рт. ст. Видно, что средний расчетный энергосъем для этой смеси составляет около 0.5 Дж/л при  $x > 400$  см.

Результаты расчетов позволяют заключить, что при достижении в экспериментах достаточной однородности среды можно вполне надеяться на успех в получении лазерного эффекта на основе предложенной кинетической схемы инициирования.

1. Азаров М.А., Дроздов В.А., Игошин В.И., Куров А.Ю., Петров А.Л., Пичугин С.Ю., Трошчиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **24**, 983 (1997).
2. Игошин В.И., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **21**, 417 (1994).
3. Башкин А.С., Курдоглян М.С., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **194**, 49 (1989).
4. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трошчиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **29**, 21 (1999).
5. Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Стукалина И.Л. *Квантовая электроника*, **30**, 580 (2000).