

СКЕЙЛИНГ-ЭФФЕКТ В ЦЕПНОМ ХИМИЧЕСКОМ HF-ЛАЗЕРЕ НА СТОЯЧЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ

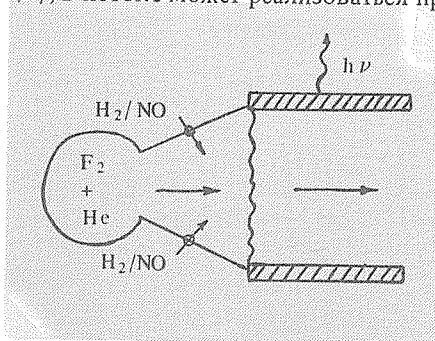
В.И. Львов, И.В. Мельников, В.А. Щеглов

УДК 621.375

На основе скейлинг-эффекта указан способ быстрой и достаточно точной оценки энергетических характеристик HF-лазера на стоячей детонационной волне.

В работе /1/ исследовались физические особенности и рассчитывались энергетические характеристики непрерывного химического HF-лазера на стоячей детонационной волне. Полное описание такой системы требует привлечения численных методов, учитывающих специфику кинетики процессов, формирующих активную среду. Некоторые общие закономерности рассматриваемого лазера были проанализированы в /2/ на основе аналитического подхода, который позволяет выявить параметр подобия задачи и указать способ быстрой и достаточно точной оценки энергетических характеристик HF-лазера при изменении состава исходной газовой смеси.

Схема HF-лазера на стоячей детонационной волне показана на рис. 1. Исходная газовая смесь F_2 -He с начальной комнатной температурой истекает из резервуара, расширяясь и охлаждаясь в сверхзвуковом канале, в определенном сечении которого осуществляется инъекция вторичного потока H_2 -NO. Если сопло работает в перерасширенном режиме, то, как известно /3/, в потоке может реализоваться прямой скачок уплотнения.

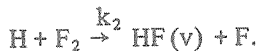


Р и с. 1. Схема действия HF-лазера с инициирующим реагентом на стоячей детонационной волне.

За фронтом ударного скачка осуществляется "поджиг" вспомогательной реакции



с последующим развитием цепного процесса возбуждения молекул HF (v):



Температурные зависимости констант реакций (1) и (2) имеют вид: $k_0 = 7 \cdot 10^{-13} \exp(-1150/T) / 4,5$, $k_1 = 2,7 \cdot 10^{-10} \exp(-800/T)$ и $k_2 = 2 \cdot 10^{-10} \times \exp(-1200/T) / 6$. Константы k_0 , k_1 и k_2 выражены в $\text{см}^3/\text{с}$, температура T — в К.

Во фтороводородных лазерах основной канал релаксации колебательно возбужденных молекул HF (v) связан с процессами самодеактивации $HF(v) + HF \rightarrow HF(v-1) + HF$, где вероятность деактивации высоких колебательных состояний HF (v) определяется степенной зависимостью от номера уровня $P_{v,v-1} = v^{\gamma} P_{1,0}$ в отличие от линейной зависимости, характерной для модели гармонического осциллятора. Следуя методике, изложенной в [2], легко показать, что вид формул скейлинг-эффекта для цепного химического HF-лазера на стоячей детонационной волне остается неизменным при любом значении параметра γ , хотя значения масштабных коэффициентов меняются при изменении γ .

Ниже будут указаны параметры подобия и определены энергетические характеристики HF-лазера на стоячей детонационной волне в двух практически важных случаях: 1) при стехиометрическом соотношении компонентов ($[F_2]_0 = [H_2]_0$) и 2) при $[F_2]_0 \gg [H_2]_0$.

В первом случае параметром подобия служит величина

$$q_1 = q_{10} (\xi_{H_2} / \xi_{NO})^{1/2}, \quad (3)$$

где q_{10} — масштабный коэффициент; ξ_{H_2} , ξ_{NO} , ξ_{F_2} , ξ_{He} — моль-массовые концентрации соответствующих компонентов исходной смеси. Для дальнейшего представим q_1 как функцию координаты обрыва генерации:

$$\Theta_+ = (x_+ / x_0) (\xi_{H_2} \xi_{NO})^{1/2}, \quad (4)$$

где x_+ — ширина лазерной зоны; x_0 — масштабный коэффициент. Соответствующая формула имеет вид: $q_1 = (1 - \text{th}^2 \Theta_+) / \text{th}^3 \Theta_+$. Можно показать, что плотность лазерных квантов в этом случае определяется выражением $\eta_{\text{кол}}^* = (1/3) (2 + \text{th}^2 \Theta_+) - 2q_1 (\Theta_+ - \text{th} \Theta_+)$, а химический КПД равен

$$\eta_{\text{хим}} = \eta_{\text{кол}} (\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2\epsilon_j) / \epsilon_{\text{хим}}, \quad (5)$$

где $\epsilon_{\text{хим}}$ — среднее число квантов химической энергии, выделяющееся в цепном процессе (2) (на одну молекулу реагента, взятого с недостатком); ϵ_1 и ϵ_2 — средние числа квантов химического возбуждения звеньев цепи; ϵ_j — среднее остаточное число колебательных квантов.

Во втором случае параметр подобия q_2 имеет вид:

$$q_2 = q_{20} (\xi_{\text{H}_2}^2 / (\xi_{\text{NO}} \xi_{\text{F}_2}))^{1/2}, \quad (6)$$

где q_{20} — масштабный коэффициент. Параметр подобия связан с координатой обрыва генерации соотношением

$$q_2 = \Theta_+ \exp(-\Theta_+) / (1 - \exp(-\Theta_+))^2, \quad (7)$$

$$\Theta_+ = (x_+ / x_0) (\xi_{\text{F}_2} \xi_{\text{NO}})^{1/2}.$$

Выражение для плотности лазерных квантов в случае нестехиометрического соотношения компонентов принимает вид:

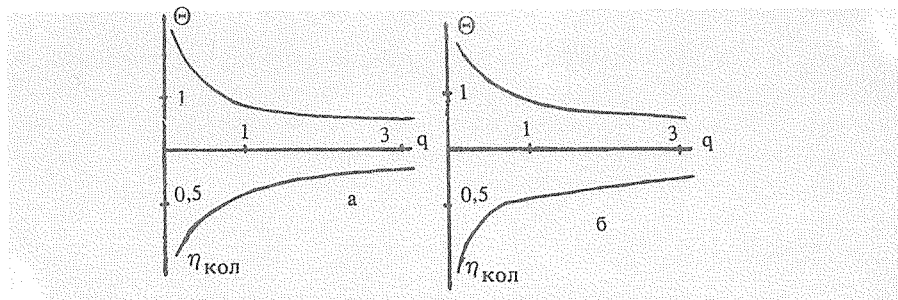
$$\eta_{\text{кол}}^* = (1 - \exp(-\Theta_+)) - q_2 [\Theta_+ - \pi^{1/2} \text{erf}(\Theta_+) + (\pi/8)^{1/2} \text{erf}(\sqrt{2}\Theta_+)],$$

а химический КПД определяется соотношением (5).

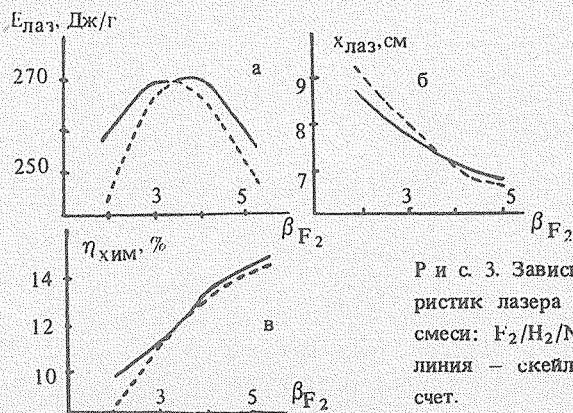
Удельная лазерная энергия $E_{\text{лаз}}$ определяется из соотношения $E_{\text{лаз}}^* = E_{\text{хим}} \eta_{\text{хим}}^*$, где потенциальный запас химической энергии $E_{\text{хим}}^* = 5,438 \cdot 10^5 \xi_{\text{H}_2} / W$ выражается в Дж/г (W — молекулярный вес смеси).

Полученные формулы можно использовать для оценки энергетических характеристик лазера и определения состава смеси, близкого к оптимальному. Масштабные коэффициенты q_0 и x_0 определяются на основе известных (из опыта или численного анализа) энергетических характеристик $\eta_{\text{хим}}^*$, ϵ_j^* , x_+^* , $E_{\text{лаз}}^*$ для определенного состава смеси следующим образом: по $\eta_{\text{хим}}^*$ и ϵ_j^* определяется плотность лазерных квантов $\eta_{\text{кол}}^*$ и с помощью соответствующего универсального графика находится параметр подобия q^* , отвечающий исходному варианту. По найденному параметру определяется координата

обрыва генерации Θ_{\ddagger}^* , соответствующая исходному варианту. Значения q^* и Θ_{\ddagger}^* позволяют с помощью приведенных выше формул ((3), (4) для случая 1 и (6), (7) для случая 2) определить соответствующие масштабные коэффициенты.



Р и с. 2. Универсальные графики скейлинг-эффекта при нестехиометрическом (а) и стехиометрическом (б) соотношениях компонентов.



Р и с. 3. Зависимость энергетических характеристик лазера от содержания F_2 в исходной смеси: $F_2/H_2/NO/He = \beta_{F_2}/1/1/20$. Сплошная линия — скейлинг, пунктирная — численный счет.

Для определения энергетических характеристик лазера при произвольном варианте смеси по формулам (3) в первом случае и (7) во втором определяется параметр подобия q ; далее, по соответствующему универсальному графику (рис. 2) находят координату обрыва генерации и плотность колебательных квантов, через которые и определяются все энергетические характеристики HF-лазера на стоячей детонационной волне.

При расчетах по изложенной методике был выбран следующий реперный вариант исходной смеси: $F_2/H_2/NO/He = 3,5/1/1/20$; при этом $\eta_{хим}^* = 12\%$, $\epsilon_J^* = 0,50$, $x_+^* = 7,3$ см. Указанные характеристики были определены при численном эксперименте на основе модели, изложенной в /1/, при этом принимались следующие значения параметров: $\gamma = 2,7$, $\epsilon_1 = 2,16$, $\epsilon_2 = 5,26$, $\epsilon_{хим} = 13$. Результаты расчетов для различных составов исходной смеси представлены на рис. 3. Видно, что расчеты по методике, основанной на скейлинг-эффекте, хорошо согласуются с результатами численного счета и дают достаточно точную оценку энергетике лазера при произвольном составе исходной газовой смеси.

Поступила в редакцию 22 февраля 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников И. В., Степанов А. А., Щеглов В. А. Препринт ФИАН № 104, М., 1985.
2. Львов В. И., Степанов А. А., Щеглов В. А. Квантовая электроника, 12, № 6, (1985).
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., Наука, 1969.
4. Rapp D, Jonson H. S. J. Chem. Phys., 33, 695 (1960).
5. Kolb C. E. J. Chem. Phys., 64, 3087 (1976).
6. Башкин А. С. и др. Химические лазеры. М., Наука, 1982.