

УДК 621.378.33

О ВОЗМОЖНОСТЯХ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО HCl ЛАЗЕРА

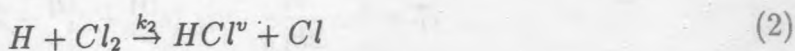
В. И. Игошин

Выполнены расчеты, показывающие возможности повышения химического КПД HCl лазера в непрерывном режиме работы за счет оптимизации условий в сверхзвуковом газовом потоке на выходе соплового блока, а также использования "горячей реакции" $H + Cl_2$.

Получение достаточно эффективной генерации на хлористом водороде представляет значительный интерес, поскольку излучение с длиной волны $\lambda \approx 3,8$ мкм попадает в окно прозрачности атмосферы. Реализованные химические КПД η импульсных HCl лазеров на реакции $H_2 + Cl_2$ с фото- и электроразрядным иницированием лежат в пределах 0,001–0,1% [1]. Для получения практически интересных параметров необходимы значения $\eta \simeq 1\%$ и более.

Проведенные ниже расчеты показывают, что необходимое улучшение эффективности может быть достигнуто в непрерывном режиме работы за счет выбора оптимальных условий в сверхзвуковом газовом потоке, выходящем из соплового блока (температуры, состава и квантового числа J , определяющего спектральный режим излучения). Другой возможный путь создания эффективного лазера на хлористом водороде – это использование только "горячей" реакции $H + Cl_2 \rightarrow HCl^v + Cl$ ($\Delta H = -45$ ккал/моль). Этот подход также рассмотрен ниже.

Остановимся на трудностях, возникающих на пути использования цепи Нернста



для получения генерации лазерного излучения на HCl . Они обусловлены тем, что: а) первая стадия цепи очень медленна, б) в "холодной" реакции $Cl + H_2$ образуется невозбужденный хлористый водород, что резко (в два раза) снижает средний запас колебательных квантов на одну молекулу HCl и приводит к исчезновению частичной инверсии в R -ветви с низкими и средними значениями квантового числа $J = 1 - 6$. Использование для генерации переходов с высокими J затруднительно вследствие малого коэффициента усиления. Разрушение же полной инверсии, обусловленное VV -обменом происходит при очень малой глубине превращения реагентов [2]. Кроме того, атомы хлора, согласно наиболее надежным измерениям [3], являются очень эффективными катализаторами $V \rightarrow R, T$ -релаксации HCl . Поэтому возникают серьезные ограничения на преодоление релаксации за счет увеличения концентрации активных центров и, следовательно, скорости цепной реакции.

Используя аналитическую методику [3, 4], проанализируем возможности реакции водорода с хлором для более эффективного получения когерентного излучения за счет частичной инверсии. Будем считать, что основным катализатором релаксации являются атомы хлора. Это справедливо, если относительное содержание хлора превышает 0,1%. Тогда для плотности мощности лазерного излучения можно записать:

$$P_l = \hbar\omega_l [W(\epsilon_1^{(1)} + \epsilon_1^{(2)} - 2\epsilon_2) - 2k_{1,0}\epsilon_2 n_{Cl} \int_0^t W dt'], \quad (3)$$

где для скорости реакции W имеем

$$W = k_1 n_{Cl} n_{H_2} = k_2 n_H n_{Cl_2},$$

n_M - концентрация компонента M , $\epsilon_1^{(1)} = 0$ и $\epsilon_1^{(2)} \simeq 2, 1$ - число колебательных квантов, возбуждаемых в реакциях (1) и (2) соответственно, $\epsilon_2 = \exp(-2J\theta_r/T)$, $\theta_r = 15K$, $k_{1,0}$ - константа скорости $V \rightarrow R, T$ -релаксации HCl на Cl . Пренебрегая выгоранием реагентов, положим $W = \text{const}$, тогда для длительности генерации получим

$$t_l = \frac{\epsilon_1^{(1)} + \epsilon_1^{(2)} - 2\epsilon_2}{2k_{1,0}n_{Cl}}, \quad (4)$$

а энергия генерации и химический КПД определяется интегрированием P_l по времени:

$$\epsilon_l^e = \hbar\omega_l \frac{k_1}{2k_{1,0}} \cdot n_{H_2} (\epsilon_1^{(1)} + \epsilon_1^{(2)} - 2\epsilon_2)(1 - \epsilon_2), \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\hbar\omega_l}{(-\Delta H)} \cdot \frac{k_1}{2k_{1,0}} \cdot (\epsilon_1^{(1)} + \epsilon_1^{(2)} - 2\epsilon_2)(1 - \epsilon_2) \frac{n_{H_2}}{n_{Cl_2}}. \quad (6)$$

Эти соотношения справедливы в условиях вращательного равновесия. Поэтому представляет интерес оценка области значений числа J , в которой это допущение справедливо. Опираясь на теорию, развитую в [4], рассмотрим энергетику HCl лазера с учетом вращательной неравновесности. При наличии вращательной неравновесности лазерная энергия ϵ_l^{ne} определяется соотношением:

$$\frac{\epsilon_l^{ne}}{\epsilon_l^e} = \frac{1 + \exp(2J\theta_r/T)}{1 + M_J\tau_r g_{1,0} + \exp(2J\theta_r/T)}, \quad g_{1,0} = k_{1,0}n_{Cl}, \quad (7)$$

где τ_r – характерное время вращательной релаксации ($\simeq 10^{-9}$ с при давлении 1 атм), $M_J = \frac{T}{\theta_r} \cdot \frac{1}{2J+1} \cdot e^{J(J+1)\frac{\theta_r}{T}} - 1$. Учет вращательной неравновесности согласно (7) приводит к появлению оптимального значения $J = 12$, при котором энергосъем максимален и близок к $\epsilon_l^e (J = 12)$. Подставляя в (6) термодинамические, спектроскопические и кинетические данные, нетрудно рассчитать химический КПД как функцию температуры. Подобный расчет показывает, что при $n_{H_2}/n_{Cl_2} = 10, T = 400 K, J = 12$ величина η достигает максимального значения $\simeq 1\%$, что вполне удовлетворяет практическим требованиям. Отметим, что для реализации усиления на переходах с высокими значениями J перспективно применение многопроходовых усилителей. В режиме свободной генерации при достаточно высокой добротности резонатора, когда возможна генерация на переходах с $J \lesssim 12, \epsilon_l$ будет также близко к рассчитанному максимальному значению.

Оценим энергетику HCl лазера на "горячей" реакции $H + Cl_2 \rightarrow HCl^v + Cl$. Основной проблемой в этом лазере является получение атомарного водорода. В последние годы в литературе высказаны интересные предложения по получению свободных атомов H в потоке газа [5]. Для этого может быть использована реакция $F + H_2 \rightarrow HF + H$, причем для получения атомов F применяется хорошо отработанная методика [3]. Из общей формулы для плотности мощности лазерного излучения [3] применительно к реакции $H + Cl_2 \xrightarrow{k} HCl^v + Cl$ можно получить:

$$P_l = \hbar\omega_l W_0 [e^{-st}(\epsilon_1 - \epsilon_2) - g_{1,0}\epsilon_2 \frac{1}{s}(1 - e^{-st})], \quad (8)$$

где $W_0 = kn_H^0 n_{Cl_2}^0; s = kn_{Cl_2}^0; g_{1,0} = k_{1,0}^{HCl-Cl,H} (n_{Cl} + n_H); \epsilon_1 = 2, 1; n_M^0$ – начальная концентрация компонента M . Интегрируя (8) по времени до момента срыва генерации t_l , найдем:

$$t_l = \frac{1}{kn_{Cl_2}^0} \ln \left[1 + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)S}{g_{1,0}\epsilon_2} \right], \quad (9)$$

$$\epsilon_l \simeq \hbar\omega_l n_H^0, \quad (10)$$

$$\eta \simeq \hbar\omega_l / (-\Delta H). \quad (11)$$

Предполагается, что релаксация обусловлена в основном атомами Cl и H . Удельный энергоотъем в расчете на грамм атомарного водорода составит $\simeq 40$ кДж/г, что несомненно выявляет очень высокие потенциальные возможности лазера на "горячей" реакции.

Подчеркнем, что реализация прогнозированных достаточно высоких удельных характеристик HCl лазера возможна в сверхзвуковом варианте лазера, причем на выходе соплового блока подбираются указанные оптимальные условия по составу и температуре. Отметим, что формулы (4), (9) для t_l позволяют оценить ширину зоны генерации: $a = ut_l$, где u – скорость потока. Так в случае реакции $H_2 + Cl_2$ при $u = 10^5$ см/с, $n_{Cl} = 10^{16}$ см $^{-3}$ получим $a = 10$ см. Формулы (5), (10) для ϵ_l позволяют определить секундный расход H_2 , или H для получения заданной мощности, поскольку $P_l = \epsilon_l$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Башкин А. С. и др. Химические лазеры. В кн.: Итоги науки и техники: Сер. "Радиотехника". – М., ВИНТИ, 1975, т. 8.
- [2] Игошин В. И., Ораевский А. Н. Препринт ФИАН N 162, М., 1969; ХВЭ, 5, 397 (1971).
- [3] Basov N. G. et al. Chemical Lasers, Springer - Verlag, 1990.
- [4] Игошин В. И., Курдоглыан М. С., Ораевский А. Н. Квантовая электроника, 8, 941 (1981).
- [5] Warren W. R., Schneider L. E. SPIE, 1225, 571 (1990).

Поступила в редакцию 22 июля 1993 г.