

# ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ СУММАРНЫХ И РАЗНОСТНЫХ ЧАСТОТ В УСЛОВИЯХ ДВУХФОТОННОГО РЕЗОНАНСА ПО НАКАЧКЕ

Н. Е. Корниенко и В. Л. Стрижевский

Четырехфотонные резонансные параметрические взаимодействия (ЧРПВ) в газообразных средах и криогенных жидкостях в последние годы с успехом используются для создания новых источников когерентного излучения в далеких УФ и ИК областях спектра, визуализации ИК излучения и ряда других целей. Исследованию ЧРПВ посвящено уже относительно много работ и экспериментально получены большие квантовые коэффициенты (до 58%) [1, 2], но теоретически возможные предельные эффективности преобразования не установлены даже для случая плоских монохроматических волн. Последнее обусловлено сложностью рассматриваемых процессов, сопровождающихся ограничивающими некогерентными двухфотонными процессами, явлениями насыщения, захватом фаз взаимодействующих волн, параметрическим просветлением (ПП) вещества.

В настоящей работе найдены предельные коэффициенты преобразования по числу фотонов для четырехфотонных процессов генерации суммарных и разностных частот  $\omega_3 = 2\omega_1 \pm \omega_2$  ( $\omega_1, 2$  — частоты накачки и сигнала) при двухфотонном резонансе (ДФР) по накачке ( $2\omega_1 = \omega_{21}$ ,  $\omega_{21}$  — эффективная частота запрещенного перехода между состояниями 1 и 2).

1. При точном резонансе и фазовом синхронизме система уравнений [1], описывающая рассматриваемые процессы, с учетом захвата фаз взаимодействующих волн при граничных условиях  $A_{1,20} \neq 0$ ,  $A_{30} = 0$  ( $A_{j0}$  ( $j=1, 2, 3$ ) — амплитуды волн  $\omega_j$  на входе в нелинейную среду ( $z=0$ )) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{d\xi} &= -2na_1u, \quad n = \frac{\Delta N}{N} = (1 + u^2)^{-1}, \quad \Delta N = N_1 - N_2, \\ \frac{da_2}{d\xi} &= \mp n\chi a_3u, \quad u = a_1^2 - a_2a_3, \quad \chi = \frac{|\chi_2| \omega_2 \omega_3 k_1}{|\chi_1| \omega_1^2 \sqrt{k_2 k_3}}, \\ \frac{da_3}{d\xi} &= n\chi a_2u, \quad a_j = \frac{\omega_1}{\omega_j} \sqrt{\frac{k_j}{k_1}} \frac{|A_j|}{A_{1нас}}, \\ \xi = \frac{z}{l}, \quad A_{1нас} &= \sqrt{\frac{\hbar}{2|\chi_1| \sqrt{T_1 T_2}}}, \quad l = \frac{c^2 \hbar k_1}{2\pi \omega_1^2 T_2 N A_{1нас}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь верхний знак соответствует генерации суммарной частоты (ГСЧ), а нижний — генерации разностной частоты (ГРЧ);  $a_j$  — безразмерные действительные амплитуды волн ( $a_j^2/a_j^2$  равно отношению плотностей потоков фотонов волн  $\omega_{i,j}$ );  $\xi$  — безразмерная длина;  $n$  — относительная разность населенностей;  $N_{1,2}$  — заселенности состояний 1, 2;  $N$  — концентрация атомов или молекул;  $\chi_{1,2}$  — поляризуемости второго порядка, ответственные за двухфотонное поглощение (ДФП) накачки ( $\chi_1$ ) и комбинационное рассеяние излучения суммарной частоты ( $\omega_3 \rightarrow \omega_2$ ) в случае ГСЧ или ДФП с участием волны разностной частоты в случае ГРЧ [1];  $T_{1,2}$  — времена релаксации;  $k_j$  — длины волновых векторов на частотах  $\omega_j$ . Укажем, что при двухфотонном резонансе между состояниями  $3s$  и  $3d$  в парах Na [2] при давлении  $10 \text{ Тор}$  ( $N = 1.17 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ )  $l = 3.5 \text{ см}$ , а  $A_{1нас}$  соответствует интенсивности  $1.13 \text{ МВт/см}^2$ .

2. Из общего вида системы (1) видно, что ГРЧ прекращается при установлении режима ПП среды, когда  $n=1$ ,  $u=0$  и асимптотически устанавливаются постоянные амплитуды волн  $\tilde{a}_j$ , связанные соотношением  $\tilde{a}_1^2 = \tilde{a}_2 \tilde{a}_3$ . В случае ГСЧ может реализоваться режим ПП или полное преобразование сигнала ( $a_2=0$ ).



Используя условие III ( $u=0$ ) и первый интеграл системы II

$$a_3^2 = \pm (a_{20}^2 - a_2^2), \quad \frac{a_2}{a_{20}} = \cos \ln \left( \frac{a_{10}}{a_1} \right)^{1/2} \quad \text{для ГСЧ}, \quad \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 - a_{20}^2}}{a_{20}} = \left( \frac{a_{10}}{a_1} \right)^{1/2} \quad \text{для ГРЧ} \quad (2)$$

можно найти связь предельных квантовых коэффициентов преобразования в режиме III  $\tilde{\eta} = \tilde{a}_3^2/a_{20}^2$  для процессов ГСЧ и ГРЧ с заданными начальными плотностями потоков фотонов накачки и сигнала  $p = a_{10}^2/a_2^2$  и параметром  $\chi$ , определяющим свойства нелинейной среды

$$p = \begin{cases} \chi \sqrt{\tilde{\eta}(1-\tilde{\eta})} \exp\left(\frac{4}{\chi} \arcsin \sqrt{\tilde{\eta}}\right) & \text{для ГСЧ,} \\ \chi \sqrt{\tilde{\eta}(1+\tilde{\eta})} (\sqrt{\tilde{\eta}} + \sqrt{1+\tilde{\eta}})^{4/\chi} & \text{для ГРЧ.} \end{cases}$$

Зависимости  $\tilde{\eta}(p)$  при различных значениях  $\chi$  приведены на рис. 1. Следует отметить, что при ГРЧ режим III устанавливается всегда, а при ГСЧ — только при условии

$$p \leq p_0 = \frac{f^2}{\sqrt{1+f^2}} \exp\left(\frac{2}{f} \arcsin \sqrt{\tilde{\eta}_0}\right), \quad \tilde{\eta}_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}\right), \quad f = \frac{\chi}{2}, \quad (4)$$

причем в последнем случае зависимость  $\tilde{\eta}(p)$  двухзначная. Исследование на устойчивость показывает, что устойчивой является нижняя ветвь зависимости

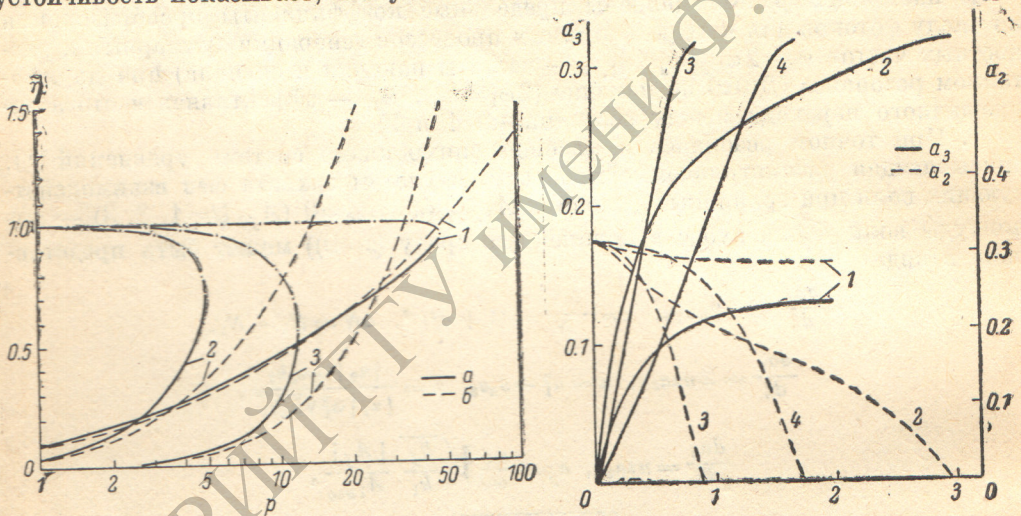


Рис. 1. Зависимость квантового коэффициента преобразования в режиме III  $\tilde{\eta}$  при генерации суммарных (а) и разностных (б) частот от отношения начальных интенсивностей накачки и сигнала  $p = a_{10}^2/a_{20}^2$  при различных значениях параметра  $\chi$ .

1 —  $\chi=1$ , 2 —  $\chi=4$ ; 3 —  $\chi=20$ .

Рис. 2. Зависимости  $a_3$  и  $a_2$  от  $\xi$  для ГСЧ при  $f=2.3$  и различных значениях  $a_{10}$ .

1 —  $a_{10}=0.5$ , 2 —  $a_{10}=0.8$ , 3 —  $a_{10}=2$ , 4 —  $a_{10}=3$ .

$\tilde{\eta}(p)$ , для которой  $\tilde{\eta} \leq \tilde{\eta}_0$ . Режим III среды устанавливается путем монотонного изменения амплитуд, причем скорость его установления возрастает с ростом накачки, сигнала и параметра  $f$ .

3. Для процесса ГСЧ при  $p > p_0$  возможно полное преобразование излучения  $\omega_2$  в излучение суммарной частоты. Это иллюстрируется рис. 2, на котором показана пространственная эволюция амплитуд волн. Видно, что при слабой накачке (кривая 1) реализуется режим III. При возникновении режима 100%-го преобразования по числу фотонов оптимальная длина  $\xi_{\text{онт}}$ , при которой  $\tilde{\eta}=1$ , с ростом накачки сначала убывает, а затем начинает возрастать из-за уменьшения  $\Delta N$ . При уменьшении сигнала  $\xi_{\text{онт}}$  уменьшается и для слабых сигналов ( $a_{20} \ll a_{10}$ ) достигает минимальной величины

$$\xi_{\text{онт}}^{\text{min}} = \frac{1}{4} \left[ a_{10}^2 (1 - e^{-\pi/f}) + \frac{1}{a_{10}^2} (e^{-\pi/f} - 1) \right] \quad (5)$$



Из-за учета насыщения существует оптимальная накачка  $a_{10}^{\text{опт}}(\eta)$ , при которой определенная величина  $\eta$  достигается на минимальной длине  $\xi$ . В частности, в приближении заданного поля накачки  $a_{10}^{\text{опт}}(\eta \ll 1) = 1$ , а истощение накачки приводит к увеличению  $a_{10}^{\text{опт}}$ . Согласно (5)  $a_{10}^{\text{опт}}(\eta = 1) = \exp\left(\frac{\pi}{4f}\right)$ ,

$$a_{\text{опт}}^{\xi \text{ min}}(a_{10}^{\text{опт}}) = \text{sh}\left(\frac{\pi}{2f}\right).$$

При  $a_2 = 0$  ( $\eta = 1$ ) происходит вторичный захват фаз взаимодействующих волн и начинается процесс ГРЧ  $\omega_2 = \omega_3 - 2\omega_1$ , который описывается системой (1) при замене  $u$  на  $u' = a_1^2 + a_2 a_3$  и изменении знаков в уравнениях для  $a_2, a_3$ . При этом режим ПП невозможен и амплитуда суммарной частоты уменьшается до нуля, после чего процесс ГСЧ начинается снова при уменьшенной величине накачки. Колебания амплитуд  $a_2, a_3$  с возрастающим периодом неизбежно закончатся установлением режима ПП.

4. Из полученных результатов следует, что пространственная эволюция нелинейно-оптических процессов кроме нелинейной восприимчивости пропорциональной  $\chi_1 \chi_2$  в решающей степени определяется параметром  $f \sim |\chi^2 / \chi_1|$ , характеризующем соотношение некогерентных двухфотонных процессов, сопровождающих ЧРПВ. Укажем, что  $f$  возрастает при приближении частоты генерируемого излучения  $\omega_3$  к однофотонному резонансу (ОФР). В качестве примера приведем значение  $f$  для процесса преобразования излучения  $\text{CO}_2$  лазера ( $\lambda_2 = 10.6$  мкм) при ГСЧ в парах Na в условиях двухфотонного резонанса между различными уровнями энергии:  $f_{3s-4s} = 0.05$  ( $\lambda_1 = 0.7768$  мкм),  $f_{3s-3d} = 0.22$  ( $\lambda_1 = 0.6854$  мкм),  $f_{3s-6s} = 9.7$  ( $\lambda_1 = 0.5497$  мкм). Следует отметить, что зависимость  $P_0(f)$  имеет минимум  $P_0^{\text{min}} \approx 5$  при  $f = 2.03$ , что приводит к существованию оптимальной частотной расстройки  $\omega_3$  от ОФР даже при неучете поглощения генерируемого излучения.

Установленные закономерности генерации суммарных и разностных частот в условиях двухфотонного резонанса необходимо учитывать при создании и оптимизации параметрических преобразователей частоты на основе резонансных сред.

#### Литература

- [1] В. С. Бутылкин, Л. Е. Каплан, Ю. Г. Хронополо, Е. И. Якубович. Резонансное взаимодействие света с веществом. Наука, М., 1977.  
 [2] D. M. Bloom, J. J. Yardley, J. F. Young, S. E. Harris. Appl. Phys. Lett., 24, 427, 1974.

Поступило в Редакцию 5 мая 1982 г.