

# МОДЕЛЬ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО ВКР-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫРОЖДЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД

С.В. Войтиков

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

E-mail: [s.voitikov@dragon.bas-net.by](mailto:s.voitikov@dragon.bas-net.by)

Известно, что лазерная генерация в условиях вырождения поперечных мод сопровождается снижением порога и ростом выходной мощности [1]. Это может позволить использовать режим вырождения мод для увеличения эффективности генерации лазера с внутрирезонаторным вынужденным комбинационным рассеянием (ВКР). В настоящей работе предлагается модель внутрирезонаторного ВКР-преобразования вырожденных поперечных Лагерр-Гауссовых мод лазерного излучения в  $TEM_{00}$  – моду стоксова излучения.

В резонаторе поперечные Лагерр-Гауссовы моды с радиальным целочисленным индексом  $n \geq 0$  имеют вид

$$U_{\lambda,n}(r, z) = \sqrt{\frac{2}{L_\lambda}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\mu_\lambda^{(m)}}} u_\lambda^{(m)}(r, z), \quad z_1^{(m)} < z < z_2^{(m)} \right\},$$

$$u_{\lambda,n}^{(m)}(r, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi (r_\lambda^{(m)}(z))^2}} L_n \left( -\frac{r^2}{(r_\lambda^{(m)}(z))^2} \right) \exp \left( -\frac{r^2}{(r_\lambda^{(m)}(z))^2} \right) \times \quad (1)$$

$$\sin \left[ k_\lambda^{(m)}(z - z_{0,\lambda}^{(m)}) + k_\lambda^{(m)} \frac{r^2}{2R_\lambda^{(m)}(z)} - \psi_\lambda^{(m)}(z) + \phi_\lambda^{(m)} \right],$$

где  $\lambda$  – индекс моды с длиной волны  $\lambda_\lambda$ ,  $r$  и  $z$  – поперечный радиус и продольная координата,  $m$  – индекс элемента или зазора между лазерными элементами ( $am$  – активная среда,  $Rm$  – ВКР-среда,  $v$  – зазоры),  $k_{m,\lambda}$  – волновое число  $m$ -моды в  $m$ -среде,  $r_\lambda$  – радиус перетяжки  $\lambda$ -моды,  $L_n(r^2/r_L^{(am)2})$  – полином Лагерра,  $z_{0,\lambda}^{(m)}$  – координата перетяжки,  $z_{R,\lambda}^{(m)}$  – длина Рэлея,  $R_\lambda^{(m)} = (z - z_{0,\lambda}^{(m)}) + (z_{R,\lambda}^{(m)})^2 / (z - z_{0,\lambda}^{(m)})$ ,  $\mu_\lambda^{(m)}$  – показатель преломления  $m$ -среды,  $L_\lambda$  – оптическая длина резонатора,  $L_m$  – длина  $m$ -элемента.  $TEM_{00}$  моде соответствует выражение (1) с индексом  $n = 0$ .

Используя метод преобразования волнового уравнения для полей в резонаторе [2] впервые получены уравнения для амплитуд вырожденных поперечных мод  $E_L$  и  $E_{L,n}$  лазерного излучения и стоксовой компоненты  $E_S$ :

$$\frac{dE_L(t)}{dt} = \frac{dE_L(t)}{dt} \Big|_{am} - \frac{1}{2} \hbar \omega_L \frac{1}{\sqrt{\mu_L L_L \mu_S L_S}} Q_{L,S}(t) E_S(t) + \frac{dE_L(t)}{dt} \Big|_{loss}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_{L,n}(t)}{dt} = \frac{dE_{L,n}(t)}{dt} \Big|_{am} - \frac{1}{2} \hbar \omega_L \frac{1}{\sqrt{\mu_L L_L \mu_S L_S}} Q_{L,n,S}(t) E_S(t) + \frac{dE_{L,n}(t)}{dt} \Big|_{loss}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_S(t)}{dt} = \frac{1}{2} \hbar \omega_S \frac{1}{\sqrt{\mu_L L_L \mu_S L_S}} \left[ Q_{L,S}^*(t) E_L(t) + Q_{L,n,S}^*(t) E_{L,n}(t) \right] + \frac{dE_S(t)}{dt} \Big|_{loss}, \quad (4)$$

где  $\left. \frac{dE_L(t)}{dt} \right|_{am}$  и  $\left. \frac{dE_{L,n}(t)}{dt} \right|_{am}$  – скорости увеличения амплитуды лазерных поперечных мод в активной среде,  $\left. \frac{dE_L(t)}{dt} \right|_{loss}$ ,  $\left. \frac{dE_{L,n}(t)}{dt} \right|_{loss}$  и  $\left. \frac{dE_S(t)}{dt} \right|_{loss}$  – потери,  $Q_{L,S}(t)$  и  $Q_{L,n,S}(t)$  – амплитуды коллективных колебаний ВКР-среды:

$$\frac{dQ_{L,S}(t)}{dt} = c^2 \frac{1}{T_2} \sum_{\kappa} g_S \sqrt{\frac{\mu_L \mu_S}{L_L L_S}} \frac{E_L(t) E_S^*(t)}{8\pi \hbar \omega_S} L^{(Rm)} \Sigma_{L,S,L,S}^0 - \frac{1}{T_2} Q_{L,S}(t), \quad (5)$$

$$\frac{dQ_{L,n,S}(t)}{dt} = c^2 \frac{1}{T_2} \sum_{\kappa} g_S \sqrt{\frac{\mu_L \mu_S}{L_L L_S}} \frac{E_{L,n}(t) E_S^*(t)}{8\pi \hbar \omega_S} L^{(Rm)} \Sigma_{L,n,S;L,n,S}^0 - \frac{1}{T_2} Q_{L,n,S}(t), \quad (6)$$

где  $T_2$  – время поперечной релаксации,  $g_S$  – коэффициент ВКР-усиления,

$$\Sigma_{L,S,L,S}^0 = \frac{4}{L^{(Rm)}} \int_{V_{Rm}} u_L(r, z)^2 u_S(r, z)^2 d^3 \vec{r}, \quad (7)$$

$$\Sigma_{L,n,S;L,n,S}^0 = \frac{4}{L^{(Rm)}} \int_{V_{Rm}} u_{L,n,S}(r, z)^2 u_S(r, z)^2 d^3 \vec{r}. \quad (8)$$

Получено уравнение для скорости изменения населённости  $n_u(r, t)$  верхнего лазерного уровня в активной среде при стимулированном испускании:

$$\begin{aligned} \frac{dn_u(r, t)}{dt} = & -c\sigma_{am} [n_u(r, t) - n_l(r, t)] \frac{2}{\pi (r_L^{(am)})^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{(r_L^{(am)})^2}\right) \frac{1}{8\pi \hbar \omega_L L_L} \times \\ & \times \left( E_L(t) + L_n \left( -\frac{r^2}{(r_L^{(am)})^2} \right) E_{L,n}(t) \right) \left( E_L^*(t) + L_n \left( -\frac{r^2}{(r_L^{(am)})^2} \right) E_{L,n}^*(t) \right) + pump - losses, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\sigma_{am}$  – сечение стимулированного испускания,  $pump$  – накачка. Как видно из уравнения (9), при вырождении поперечных Лагерр-Гауссовых мод лазерного излучения динамика населённости верхнего лазерного уровня зависит не от суммы интенсивностей поперечных мод, но от суммы их амплитуд, что влияет на стимулированное испускание лазерного излучения, которое, в свою очередь, влияет на генерацию стоковой компоненты.

Выводы: в предложенной модели внутррезонаторного ВКР-преобразования вырожденных поперечных Лагерр-Гауссовых мод лазерного излучения в TEM<sub>00</sub>-стоксовую компоненту получены и проанализированы скоростные уравнения для амплитуд поперечных мод лазерного излучения, амплитуды стокового излучения и для скорости изменения населённости верхнего лазерного уровня в активной среде вследствие стимулированного испускания.

1. Hsiao-Hua Wu, Chich-Chang Sheu, Ting-Wei Chen, et al. // Opt. Commun. 1999. 165. P.225–229
2. Voitkov S.V., Demidovich A.A., Danailov M.B., Orlovich V.A. // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2014. 47. P.105402 (14pp)