

Е. Л. КЛЮЧАН, Л. С. КОРНИЕНКО, Н. В. КРАВЦОВ,  
Е. Г. ЛАРИОНЦЕВ, А. Н. ШЕЛАЕВ

## ОДНОНАПРАВЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ЛАЗЕРЕ

(Представлено академиком А. М. Прохоровым 29 VI 1973)

Режим бегущей волны в твердотельном кольцевом лазере представляет большой интерес для получения одномодовой генерации при больших интенсивностях излучения. В подавляющем большинстве работ (см., например, (1-5)) экспериментальные исследования в этом направлении проводились лишь в импульсном режиме. В последнее время получена однонаправленная генерация в непрерывном кольцевом лазере на  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  с помощью невзаимного фарадеевского элемента, создающего неравенство добротностей для встречных волн (6).

В настоящей работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование условий существования и устойчивости режима однонаправленной генерации в кольцевом твердотельном лазере.

1. Динамика генерации кольцевого ОКГ описывается на основе следующей системы уравнений для комплексных амплитуд встречных волн  $E_{1,2}$  и плотности инверсии  $N$ :

$$\dot{E}_{1,2} = -\frac{\omega}{2Q} E_{1,2} + \frac{i\tilde{m}_{1,2}}{2} E_{2,1} \mp i\frac{\Omega}{2} E_{1,2} + \frac{\sigma}{2T} \left( E_{1,2} \int_0^l N dx + E_{2,1} \int_0^l N e^{\pm i 2kx} dx \right), \quad (1)$$

$$\dot{N} = W - \frac{N}{T_1} - \frac{a}{T_1} N |E_1 e^{-ikx} + E_2 e^{ikx}|^2;$$

здесь  $\tilde{m}_{1,2} = m_{1,2} e^{\pm i\theta_{1,2}}$  — комплексные коэффициенты связи через обратное рассеяние ( $m_{1,2}$ ,  $\theta_{1,2}$  — модули и фазы коэффициентов связи),  $\omega/Q$  — ширина полосы резонатора,  $T = L/c$  — время обхода светом резонатора,  $\sigma$  — сечение перехода,  $W$  — скорость накачки,  $T_1$  — продольное время релаксации,  $l$  — длина активного элемента,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\Omega = \omega_1 - \omega_2$  — разность собственных частот резонатора для встречных волн, значение  $a = c\sigma T_1 / (8\pi\hbar\omega)$ .

Предполагается, что режим генерации является одномодовым, с частотой, близкой к центру линии люминесценции.

Ограничимся рассмотрением следующих двух случаев: 1) фазы коэффициентов связи равны ( $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ), а модули произвольны; 2) фазы отличаются на  $\pm\pi$  ( $\theta_1 = \theta_2 \pm \pi = \theta$ ), модули произвольны. Если связь между встречными волнами возникает вследствие обратного рассеяния, первый случай соответствует рассеянию на неоднородностях диэлектрической проницаемости, второй — на неоднородностях проводимости.

Режим генерации будем называть однонаправленным, если амплитуда одной из встречных волн много больше, чем амплитуда другой. Для определенности положим  $E_2/E_1 \ll 1$ .

В стационарном режиме однонаправленной генерации амплитуды встречных волн и разность фаз  $\Phi$  между ними постоянны во времени и определяются выражениями

$$aE_1^2 = \eta, \quad \frac{E_2}{E_1} = \frac{m_2}{(\omega/Q)\eta} (1+\eta), \quad \cos(\Phi - \theta) = 0, \quad (2)$$

где  $\eta = (W/W_{\pi} - 1)$  — превышение мощности накачки над порогом.

В покоящемся лазере ( $\Omega = 0$ ) режим однонаправленной генерации может существовать лишь при достаточно слабом обратном рассеянии более интенсивной волны:

$$m_2 \ll \frac{\omega}{Q} \frac{\eta}{1+\eta}. \quad (3)$$

Условие устойчивости этого режима зависит от соотношения между фазовыми коэффициентами связи и имеет вид

$$-\frac{1}{2T_1} + \frac{m_2(m_2 \pm m_1)}{(\omega/Q)\eta} \frac{2+\eta}{1+\eta} < 0; \quad (4)$$

здесь знак плюс перед  $m_1$  соответствует случаю  $\theta_1 = \theta_2$ , знак минус случаю  $\theta_1 - \theta_2 = \pm\pi$ .

Из (4) следует, что в случае  $\theta_1 - \theta_2 = \pm\pi$  режим однонаправленной генерации с  $E_2 \ll E_1$  устойчив во всей области существования, если  $m_1 \geq m_2$ . В случае  $\theta_1 = \theta_2$  режим однонаправленной генерации может быть устойчивым лишь при достаточно слабой обратной связи

$$m_2(m_1 + m_2) < \frac{1}{2T_1} \frac{\omega}{Q} \eta \frac{1+\eta}{2+\eta}. \quad (5)$$

При  $m_1 = m_2$  и  $\eta \ll 1$  условие (5) совпадает с полученным в (7).

При нарушении условия (5) оказываются одновременно неустойчивыми как режим однонаправленной генерации, так и режим стоячей волны (8). В этом случае должен возникнуть режим автомодуляции интенсивностей и разности фаз встречных волн. При  $m_1 \gg m_2$  средние значения интенсивностей встречных волн оказываются существенно неравными ( $E_2 \ll E_1$ ). Автомодуляционный режим при существенно неравных средних значениях интенсивностей встречных волн будем называть нестационарным однонаправленным режимом.

2. Экспериментальное исследование условий возникновения однонаправленной генерации проводилось в кольцевом лазере на кристалле граната с примесью неодима (YAG:Nd<sup>3+</sup>). ОКГ работал в непрерывном режиме на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм. Кольцевой резонатор был образован зеркалами с радиусами кривизны  $R_1 = R_2 = \infty$  и  $R_3 = 3000$  мм. Коэффициенты отражения зеркал были близки к 99%. Периметр резонатора  $L = 117$  см, площадь  $S = 545$  см<sup>2</sup>. Торцы кристалла были просветлены (остаточный коэффициент отражения от торца  $< 0,4\%$ ). Вращающаяся платформа позволила производить измерения при скоростях вращения до 1 об/сек. Проведенные исследования показали, что режимы генерации кольцевого твердотельного лазера существенно зависят от скорости вращения и величины обратной связи, которая, в свою очередь, зависит от настройки резонатора. Настройка резонатора изменялась посредством параллельного перемещения или поворота одного из зеркал в пределах до  $1^\circ$ , а также при изменении положения кристалла внутри резонатора (поворот на угол до  $1^\circ$  и перемещение в направлении, перпендикулярном оси резонатора, на расстояние до 5 мм). Характер генерации и отношение интенсивностей встречных волн существенно зависят также от наличия и положения ди-

аффрагмы в резонаторе ОКГ. Этот эффект может быть объяснен дифракционным взаимодействием между встречными волнами <sup>(9)</sup>.

В покое лазере при определенных настройках резонатора возникает режим автомодуляции интенсивностей встречных волн. Глубина модуляции и средние значения интенсивностей встречных волн зависят от настройки резонатора. При некоторых настройках средние значения интенсивностей, а также амплитуды колебаний интенсивностей встречных

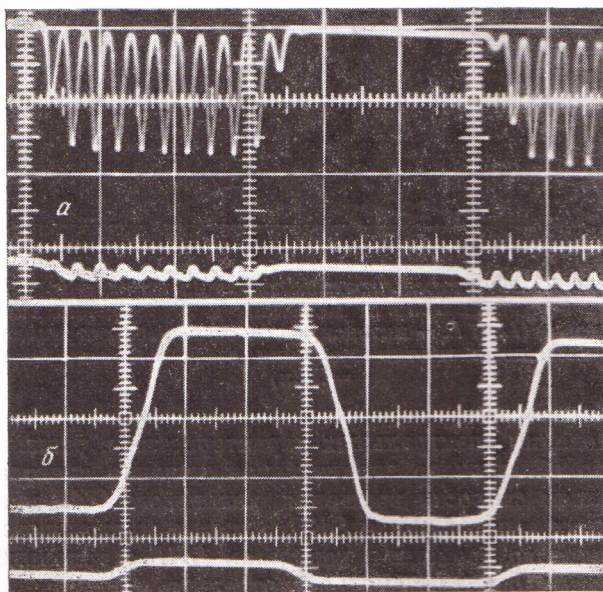


Рис. 1. Нестационарный (а) режим и стационарный (б) режим однонаправленной генерации. Превышение над порогом  $\eta=0,2$ ; развертка 200 мксек/дел

волн оказываются существенно неравными. В наших экспериментах отношение средних значений интенсивностей встречных волн в покое ОКГ достигало 30. В зависимости от настройки мог наблюдаться как нестационарный однонаправленный режим генерации (рис. 1а), так и стационарный режим (рис. 1б). На рис. 1 излучение промодулировано внешним модулятором для выделения постоянной составляющей излучения.

Отношение интенсивностей встречных волн сильно зависит от скорости вращения кольцевого лазера и при скоростях вращения  $\geq 0,1$  об/сек может превышать 150. На рис. 2 показана зависимость интенсивностей встречных волн для стационарных режимов от скорости вращения в случае равных и неравных интенсивностей встречных волн в покое ОКГ.

Введение несимметричной дополнительной связи между встречными волнами также позволяет получить большую степень подавления слабой волны в покое ОКГ ( $>150$  раз). Для создания дополнительной обратной связи одно из зеркал резонатора заменялось на полупрозрачное с коэффициентом отражения, изменяющимся в пределах 99–90%. Коэффициент отражения дополнительного зеркала был больше 99%. При непросветленных торцах кристалла заметного подавления одной из волн получить не удалось. В этом случае нарушается условие (3) и режим однонаправленной генерации не может существовать.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что режим однонаправленной генерации в кольцевом твердотельном лазере может быть



получен следующими способами: изменением связи встречных волн при настройке резонатора как за счет обратных отражений, так и за счет дифракционных эффектов; введением несимметричной обратной связи с помощью дополнительного зеркала; расщеплением частот кольцевого резонатора для встречных волн.

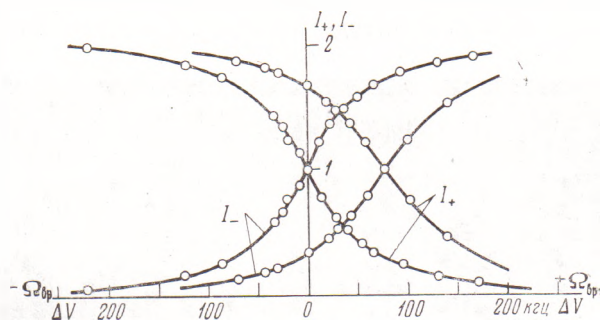


Рис. 2. Зависимость средних значений интенсивностей  $I_{\pm}$  встречных волн от величины и направления вращения ( $I_+$  и  $I_-$  — интенсивности волн, распространяющихся по и против вращения соответственно;  $\Delta\nu = \Omega/2\pi$ )

При исследовании спектральных характеристик в различных режимах генерации было обнаружено значительное сужение спектра продольных мод с увеличением скорости вращения кольцевого ОКГ и в автомодуляционных режимах в покоящемся ОКГ, а также многомодовость и нестабильность спектра во времени в кольцевом ОКГ с дополнительным зеркалом. Эти эффекты будут рассмотрены отдельно.

Научно-исследовательский  
институт ядерной физики  
Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
6 VI 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> C. L. Tang, H. Statz et al., Phys. Rev., v. 136A, № 1, 1 (1964). <sup>2</sup> В. И. Малышев, Н. С. Маркин, А. А. Сычев, Письма ЖЭТФ, т. 9, № 1, 3 (1969). <sup>3</sup> А. Л. Микаэлян, Ю. Г. Турков и др., ЖЭТФ, т. 57, № 1 (7), 38 (1969). <sup>4</sup> Л. С. Корниенко, Н. В. Кравцов и др., ЖЭТФ, т. 58, № 2, 541 (1970). <sup>5</sup> С. В. Кружалов, ЖТФ, т. 41, № 12, 2621 (1971). <sup>6</sup> A. R. Clohes, M. J. Brienza, Appl. Phys. Lett., v. 21, № 6, 265 (1972). <sup>7</sup> Э. М. Беленов, ЖТФ, т. 38, № 5, 871 (1968). <sup>8</sup> Е. Л. Клочан, Л. С. Корниенко и др., Письма ЖЭТФ, т. 17, № 8 (1973). <sup>9</sup> А. Д. Валуев, С. А. Савранский и др., Оптика и спектроскопия, т. 29, № 2, 410 (1970).