

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.826

ЭФФЕКТ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОЙ КОММУТАЦИИ
НАПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ
ЛАЗЕРАХ В РЕЖИМАХ АВТОМОДУЛЯЦИИ II РОДА

А. Н. Шелаев

(НИИЯФ)

E-mail: shelaev@srd.sinp.msu.ru)

Экспериментально и теоретически установлено, что в твердотельном кольцевом лазере (ТКЛ) на YAG:Nd^{3+} с сильной конкуренцией и нелинейной связью встречных волн (ВВ) за счет самодифракции ВВ на наведенных ими решетках инверсной населенности существует необычный для физики лазеров эффект сверхнизкочастотной неустойчивости режимов одно- и двунаправленной генерации, когда частота автокоммутации направления излучения меньше самого низкочастотного параметра ТКЛ — скорости релаксации инверсной населенности $1/T_1$ более чем в 10^5 раз (период коммутации $T_k > 10^2$ с).

Интенсивные исследования ТКЛ, проводимые в настоящее время, обусловлены как широкими возможностями практических приложений ТКЛ, особенно после создания высокоэффективных полупроводниковых лазеров для накачки ТКЛ, так и необычными особенностями динамики генерации ТКЛ, относящихся к КЛ класса В [1–3].

В КЛ класса В из-за характерного для них соотношения между временами релаксации инверсной населенности T_1 , поля $Q/\eta\omega$ (Q — добротность резонатора, η — превышение пороговой мощности накачки, ω — частота излучения) и поляризации T_2 , определяемого неравенствами $T_1 \gg Q/\eta\omega \gg T_2$, между ВВ возникает сильная нелинейная связь вследствие самодифракции ВВ на наведенных ими инерционных решетках инверсной населенности, а переходные процессы имеют колебательный характер.

Проведенные нами ранее экспериментальные исследования показали [1], что даже в простейшем типе ТКЛ, состоящем из активной среды и кольцевого резонатора, в зависимости от модулей $m_{1,2} = c\sqrt{r_{1,2}}/L$ (c — скорость света, L — периметр резонатора, $r_{1,2}$ — коэффициенты обратного рассеяния по мощности) и фаз $\theta_{1,2}$ коэффициентов связи ВВ $\tilde{m}_{1,2} = m_{1,2} \exp(\pm i\theta_{1,2})$ и разности частот кольцевого резонатора для ВВ Ω существует ряд характерных режимов свободной генерации: 1)–2) режимы одно- или двунаправленной генерации с постоянными во времени интенсивностями ВВ; 3) режимы автомодуляции I рода с противофазной (синусоидальной) модуляцией интенсивностей ВВ, частота которой $f_m \approx m \approx 10^4 - 10^6$ Гц; 4) режимы автомодуляции II рода, имеющие место при малой связи ВВ ($m \approx 0$), в которых интенсивности ВВ испытывают противофазные релаксационные коле-

бания на частотах ≤ 1 кГц; 5) режимы биений с разными частотами ВВ во вращающихся ТКЛ.

Из проведенного нами в [1] анализа условий существования и устойчивости режимов генерации в ТКЛ следует, что в отсутствие линейной связи ВВ ($m_{1,2} = 0$) в покоящемся ($\Omega = 0$) ТКЛ устойчив режим однонаправленной генерации, если относительная отстройка δ частоты генерации ω от центра линии усиления ω_0 шириной $\Delta\omega$ меньше критической δ_{cr} :

$$\delta = (\omega - \omega_0)/\Delta\omega \leq \delta_{cr} \approx (1 + \eta)/\sqrt{\eta\omega T_1/Q}.$$

При $\delta \approx 0$ и $m_{1,2} \neq 0$ режим однонаправленной генерации устойчив, если

$$m_{1,2} < m_{cr} = \sqrt{\eta\omega/4QT_1} |\cos(\theta_1 - \theta_2)/2|^{-1}.$$

Одномодовый режим двунаправленной генерации устойчив при $\delta \approx 0$ и $m_1 \approx m_2 = m$, если

$$m \sin |(\theta_1 - \theta_2)/2| > \eta\omega/3Q.$$

При $\delta > \delta_{cr}$ и $m_{1,2} \approx 0$ в покоящемся ТКЛ одновременно неустойчивы оба режима: как однонаправленной, так и двунаправленной генерации.

В настоящей работе экспериментально и теоретически установлено, что в ТКЛ на YAG:Nd^{3+} существует необычный для физики лазеров эффект сверхнизкочастотной неустойчивости режимов одно- и двунаправленной генерации, при котором частота коммутации направления излучения ТКЛ f_k (частота автомодуляции II рода) может быть на 5 порядков меньше самого низкочастотного параметра ТКЛ — скорости релаксации инверсной населенности активной среды $1/T_1 \sim 1$ кГц. Показано, что частота коммутации уменьшается при приближении отстройки δ частоты излучения от центра линии усиления к критической отстройке δ_{cr} и при уменьшении линейной связи ВВ за счет обратного рассеяния на оптических неоднородностях. В исследовавшихся нами ТКЛ при минимальной линейной связи ВВ ($r \approx 10^{-10} - 10^{-12}$

по мощности), определяемой рассеянием на неоднородностях диэлектрических зеркал и брюстеровских торцах активной среды, были получены частоты коммутации меньше $1/T_1$ на 5 порядков (период коммутации $T_k > 10^5 T_1 \approx 10^2 c$).

Обнаруженные нами экспериментально редкие ($> 1-10$ с) периодические переключения направления излучения вначале считались обусловленными техническими флуктуациями параметров ТКЛ, так как принято полагать, что лазерные процессы не могут иметь такую большую длительность. И лишь после проведения численных расчетов на высокоскоростных компьютерах удалось как воспроизвести эти редкие переключения интенсивностей ВВ, так и выяснить, какими физическими причинами они обусловлены.

Для численного исследования режимов свободной генерации ТКЛ использовалась система уравнений одномодового ТКЛ, являющаяся интегро-дифференциальной системой уравнений для комплексных амплитуд ВВ $E_{1,2}$, нулевой (пространственно-однородной) компоненты инверсной населенности $N_0 = (1/L) \int_0^L N dz$ и ее вторых гармоник $N_{\pm} = (1/L) \int_0^L N \exp(\pm i2kz) dz$ с периодом $\lambda/2$ [1]:

$$dE_{1,2}/dt = -E_{1,2}\omega/2Q_{1,2} \mp E_{1,2}i\Omega/2 + E_{2,1}im_{1,2}/2 + (1 - i\delta)(N_0 E_{1,2} + N_{\mp} E_{2,1})\sigma l/2T,$$

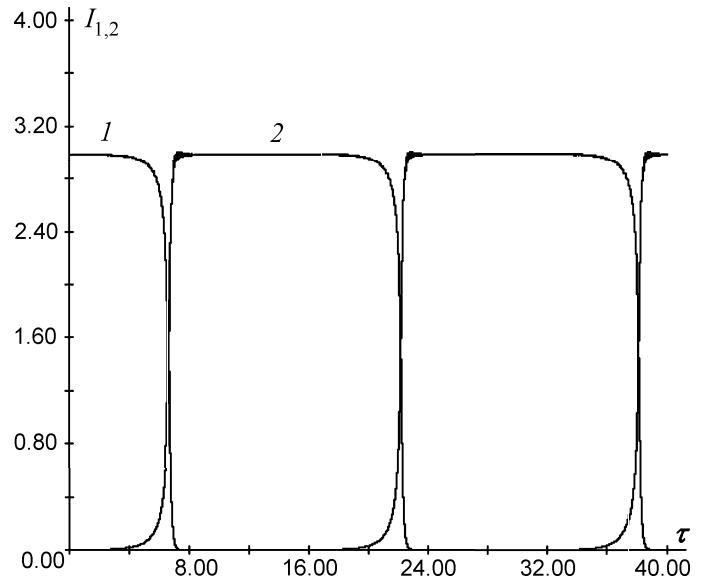


Рис. 1

$$T_1 dN_0/dt = N_{th}(1 + \eta) - N_0[1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - aN_+ E_1 E_2^* - aN_- E_1^* E_2,$$

$$T_1 dN_+/dt = -N_+[1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - aN_0 E_1^* E_2,$$

$$N_- = N_+^*,$$

$$N = N_0 + N_+ \exp(i2kz) + N_- \exp(-i2kz),$$

$T = L/c$, l — длина активной среды, a — параметр насыщения активной среды.

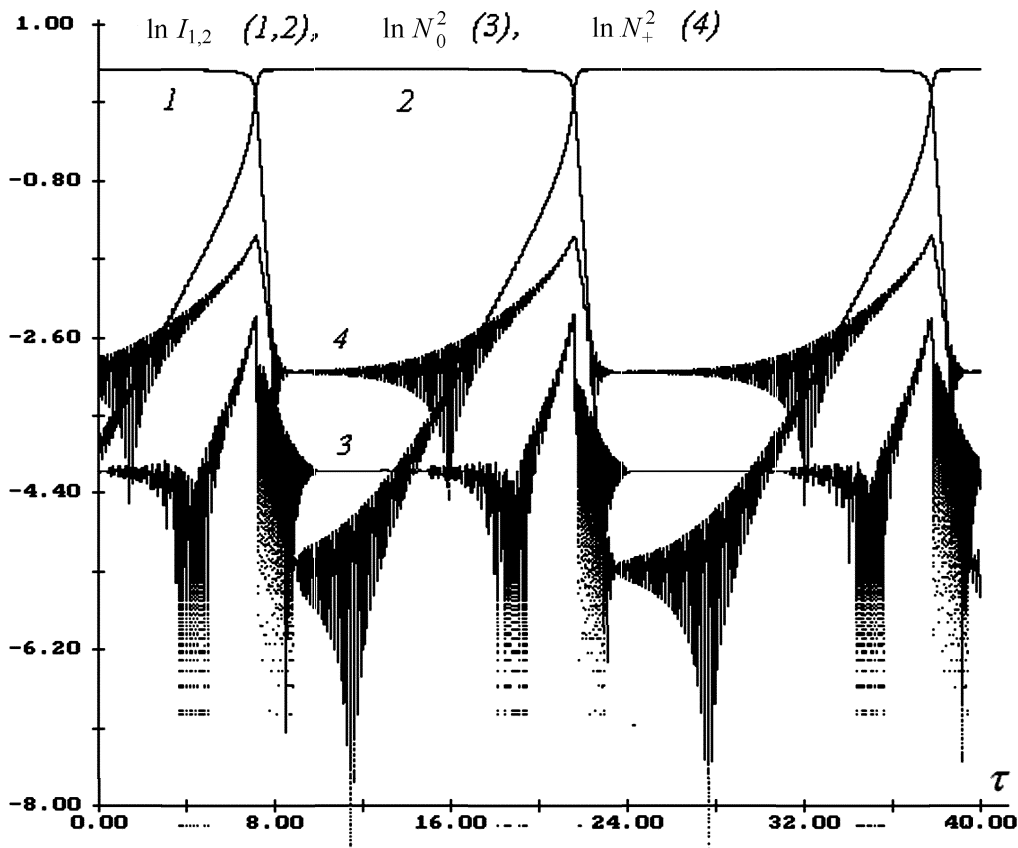


Рис. 2

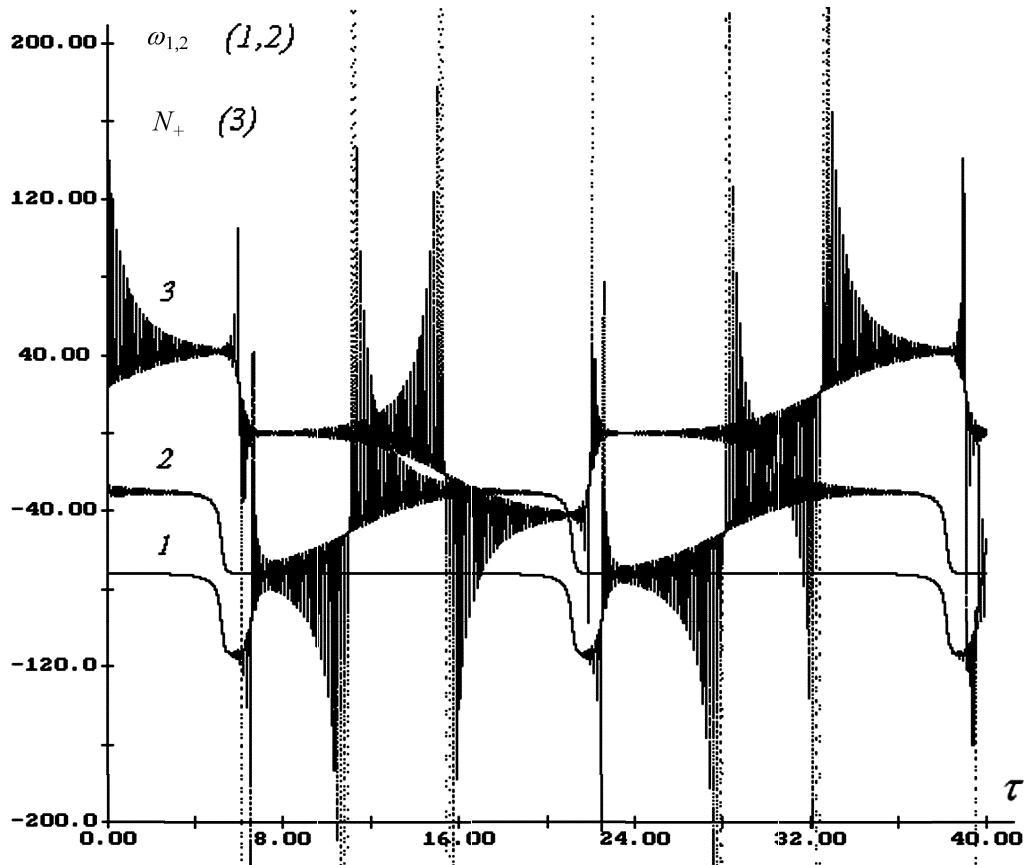


Рис. 3

Характерные расчетные зависимости интенсивностей ВВ от относительного времени $I_{1,2}(\tau) = E_{1,2}^2(\tau)$, $\tau = t/T_1$, показанные на рис. 1, полностью соответствуют экспериментально наблюдаемым зависимостям $I_{1,2}(\tau)$ в режимах автомодуляции II рода. Однако поскольку такие зависимости не показывают развитие неустойчивостей при малых интенсивностях ВВ, были проведены также расчеты зависимостей логарифмов интенсивностей ВВ $\ln I_{1,2}(\tau)$ и пространственных гармоник $\ln N_{0,\pm}^2(\tau)$ от времени.

Один из вариантов таких зависимостей логарифмов интенсивностей ВВ $\ln I_{1,2}(\tau)$ (кривые 1, 2), логарифмов нулевой $\ln N_0^2(\tau)$ (кривая 3) и второй $\ln N_+^2(\tau)$ (кривая 4) пространственных гармоник инверсной населенности от относительного времени τ показан на рис. 2.

Соответствующие зависимости изменения частот ВВ (кривые 1, 2) и второй гармоники инверсной населенности (кривая 3) от времени τ показаны на рис. 3.

Показанные на рис. 1–3 зависимости были получены при следующих значениях параметров ТКЛ: отношение времен затухания инверсной населенности и поля $T_1/T_C = T_1/(Q/\eta\omega) \approx 600$, относительный уровень накачки $N_{th}(1+\eta)/T_1^{-1} \approx 4$, относительные модули коэффициентов связи ВВ $m_{1,2}/T_1^{-1} \approx 0.001$, фазы коэффициентов связи ВВ $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$, от-

носительная отстройка частоты генерации от центра линии усиления $\delta = 0.12 > \delta_{cr} \approx 0.098$.

Как видно из рис. 3, численные решения исходной системы уравнений ТКЛ показывают, что в режимах автомодуляции II рода в покоемся ТКЛ возникает изменяющееся во времени частотное расщепление ВВ, равное по величине характерной для ТКЛ релаксационной частоте $f_r/\sqrt{2}$ [2] ($f_r \approx \sqrt{\eta\omega/QT_1} \geq 10$ кГц). Разность частот ВВ приводит к осцилляциям пространственных гармоник инверсной населенности и интенсивностей ВВ (см. рис. 2, 3), что в свою очередь приводит к изменению знаков декрементов затухания ВВ и к развитию неустойчивостей типа Андронова–Хопфа.

Детальные аналитические и расчетные зависимости, в том числе декрементов затухания ВВ от времени, будут приведены в следующей статье.

Литература

1. Kravtsov N.V., Lariontsev E.G., Shelaev A.N. // Laser Physics. 1993. **3**, N 1, P. 21.
2. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999.
3. Shelaev A.N. // Abstr. 10th Laser Physics Workshop, Russia, Moscow. 2001. 3–7 July. P. 197; 198.

Поступила в редакцию
12.03.04