

A.N. Shelaev

**SUPERLOW-FREQUENCY PERIODIC SWITCHING
OF DIRECTION OF RADIATION IN SOLID-STATE RING LASERS
WITH HOMOGENEOUSLY BROADENED GAIN LINE
IN SECOND-KIND AUTOMODULATION REGIMES**

D.V.Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP)

Lomonosov Moscow State University

Shelaev@gmail.com

It has been established experimentally and explained theoretically that in $YAG:Nd^{3+}$ solid-state ring lasers with strong competition of counterpropagating light waves (CPLW) due to homogeneously broadened gain line of active medium and nonlinear coupling of CPLW due to their self-diffraction on induced gratings of inverted population it exists very unusual for laser physics effect of superlow-frequency instability of both unidirectional and bidirectional lasing when frequency of commutation f_c of radiation direction can be much less than the most low-frequency characteristic parameter of a nonlinear system – the speed of relaxation of inverted population more then on 5 orders ($f_c < 10^{-5} 1/T_1$).

А.Н.Шелаев

сведения об авторе

**СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНАЯ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ КОММУТАЦИЯ
НАПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ
ЛАЗЕРАХ С ОДНОРОДНО-УШИРЕННОЙ ЛИНИЕЙ УСИЛЕНИЯ
В РЕЖИМАХ АВТОМОДУЛЯЦИИ ВТОРОГО-РОДА**

Экспериментально и теоретически установлено, что в твердотельном кольцевом лазере (ТКЛ) на $YAG:Nd^{3+}$ с сильной конкуренцией встречных волн (ВВ) за счёт однородного уширения линии усиления активной среды и сильной

нелинейной связью ВВ за счет самодифракции ВВ на наведенных ими в активной среде решетках инверсной населенности, существует очень необычный для физики лазеров эффект сверхнизкочастотной неустойчивости режимов одно- и двунаправленной генерации, когда частота периодической автокоммутации направления излучения меньше самого низкочастотного параметра ТКЛ – скорости релаксации инверсной населенности $1/T_1$ более чем в 10^5 раз (период коммутации $T_c > 10^2 c!$).

Интенсивные исследования ТКЛ обусловлены как весьма необычными особенностями динамики генерации ТКЛ, относящихся к КЛ класса В [1-3], так и широкими возможностями их практических приложений в гиromетрии и для генерации высокостабильного излучения, особенно после создания высокоэффективных полупроводниковых лазеров для накачки ТКЛ.

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 экспериментальные исследования показали [1,2], 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 $m_{1,2} = m_{1,2} \exp(\pm i\theta_{1,2})$ 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 пропорциональна величине связи ВВ $f_m \approx m \approx 10^4 - 10^6$ Гц; 4) режимы автомодуляции II-рода, имеющие место при малых $m \approx 0$, в которых интенсивности ВВ испытывают противофазные релаксационные колебания на частотах ≤ 1 кГц; 5) режимы биений с разными частотами ВВ при вращении ТКЛ.

Из проведенного нами в [1,2] рассмотрения 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 активной среды ω_0 , меньше критической δ_{cr} :

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

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

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

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

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

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

В данной работе экспериментально и теоретически установлено, что в ТКЛ на $YAG: Nd^{3+}$ существует также весьма необычный для физики лазеров эффект сверхнизкочастотной неустойчивости режимов одно- и двунаправленной генерации, при котором частота коммутации направления излучения ТКЛ f_c (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 исследованных 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 меньшие $1/T_1$ на 5 порядков (период коммутации $T_c \geq 10^5 T_1 \approx 10^2 c$).

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 была использована интегро-дифференциальная система уравнений однододового ТКЛ 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]:

$$\frac{dE_{1,2}}{dt} = -E_{1,2} \omega / 2Q_{1,2} \pm E_{1,2} \frac{i\Omega}{2} + E_{1,2} \frac{im_{1,2}}{2} + (1-i\delta) \cdot (N_0 E_{1,2} + N_{\pm} E_{2,1}) \frac{\sigma t}{2T} \quad (4),$$

$$T_1 \frac{dN_0}{dt} = N_{th}(1+\eta) - N_0 [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - aN_{+} E_1 E_2^* - aN_{-} E_1^* \quad (5),$$

$$T_1 \frac{dN_{\pm}}{dt} = -N_{\pm} [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - aN_0 E_1^* E_2, \quad (6),$$

$$N = N_0 + N_{+} \exp(i2kz) + N_{-} \exp(-i2kz) + \dots, \quad N_{-} = N_{+}^* \quad (7)$$

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

Характерные расчетные зависимости интенсивностей ВВ $I_{1,2}$ от времени $\tau = t/T_1$

показанные на рис. 1, полностью соответствуют экспериментально наблюдаемым зависимостям $I_{1,2}(t)$ в режимах автомодуляции II-рода.

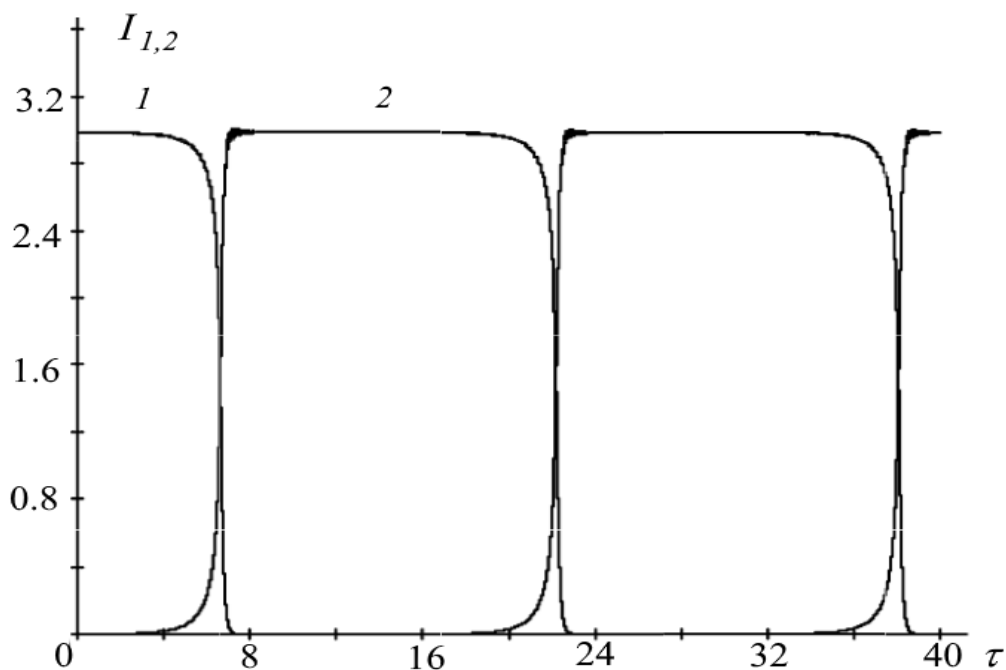


Рис. 1

Однако, поскольку такие зависимости не показывают развитие неустойчивостей в подавленной волне при её малых интенсивностях, были проведены также расчеты зависимостей логарифмов интенсивностей ВВ и пространственных гармоник N от времени. Характерные зависимости логарифмов интенсивностей ВВ $\ln I_{1,2}(\tau)$ (кривые 1, 2), а также нулевой N_0 (кривая 3) и второй N_+ (кривая 4) пространственных гармоник инверсной населенности от относительного времени $\tau = t/T_1$ показаны 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 расчётные зависимости 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 активной среды $N_{th}(1+\eta)/T_1^{-1} \approx 4$, относительные модули коэффициентов связи ВВ за счёт обратного рассеяния $m_{1,2}/T_1^{-1} \approx 0,001$, фазы коэффициентов связи ВВ

$\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = 0$, относительная отстройка частоты генерации от центра линии усиления $\delta = 0,12 > \delta_{cr} \approx 0,98$.

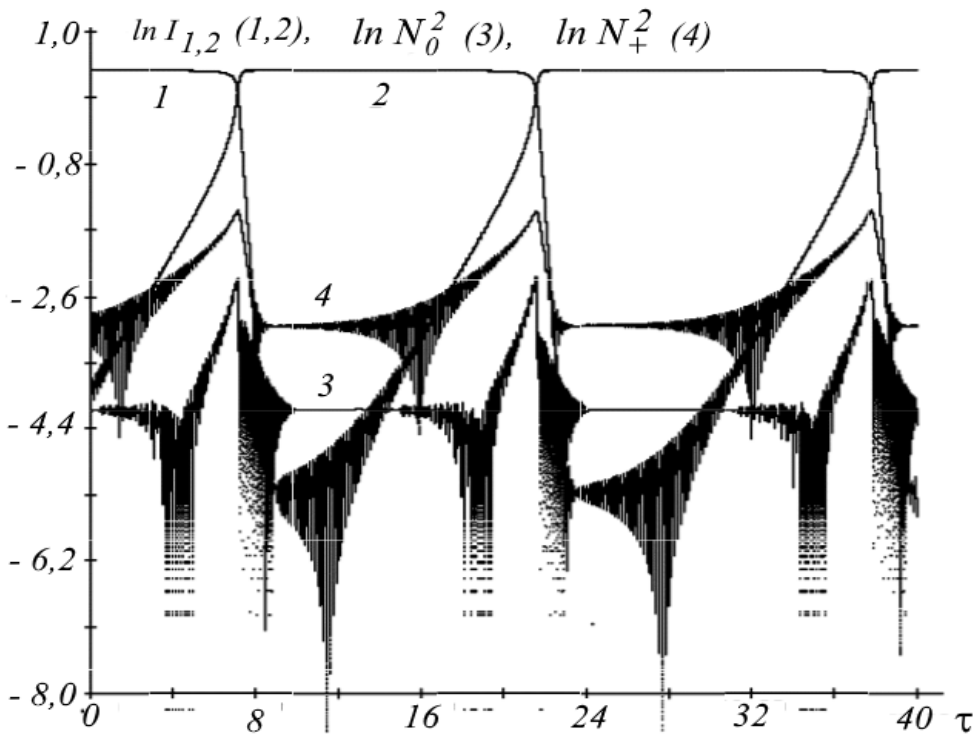


Рис. 2

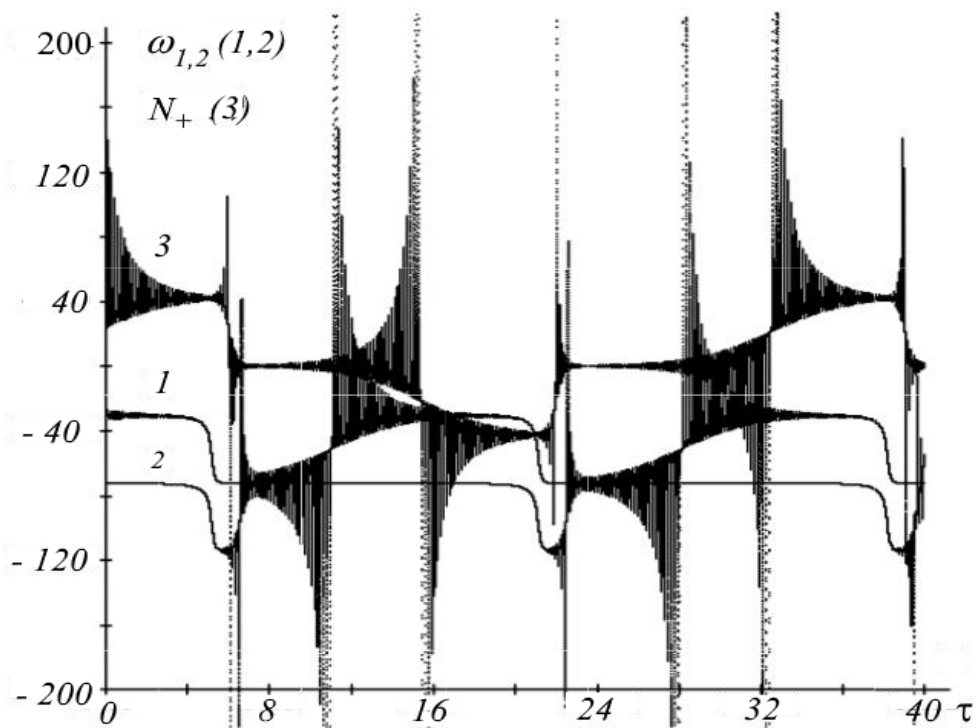


Рис. 3

Таким образом, численные решения исходной системы уравнений ТКЛ показывают, что в режимах автомодуляции II-рода даже в покое (!) ТКЛ возникает периодически изменяющееся во времени частотное расщепление ВВ, равное по величине характерной для ТКЛ релаксационной частоте $f_r / \sqrt{2}$ (где $f_r \approx \sqrt{\eta\omega / QT_1} \geq 10$ кГц). Разность же частот ВВ приводит к осцилляциям пространственных гармоник инверсной населенности и интенсивностей ВВ, что, в свою очередь, приводит к изменению знаков декрементов затухания ВВ и к очень медленному развитию неустойчивостей типа Андронова-Хопфа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, A.N. Shelaev.* Oscillation Regimes of Solid-State Ring Lasers and Possibilities for Their Stabilization. *Laser Physics*, 1993, v. 3, № 1.– P. 21-62.
2. *А.Н. Шелаев.* Динамика генерации и невзаимные оптические эффекты в твёрдотельных кольцевых лазерах. Диссертация на соискание уч. степени доктора физ.-мат. наук. М., НИИ ядерной физики МГУ, 2001. – 307 С.
3. *Я.И. Ханин.* Основы динамики лазеров. М., Наука, 1999. – 368 С