

Спонтанное нарушение спектральной симметрии в твердотельных кольцевых лазерах

А.А.Камышева, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина

Обнаружено спонтанное нарушение симметрии временных и спектральных характеристик излучения встречных волн в твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) при периодической модуляции мощности накачки. Сравнение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования показало, что рассматриваемые явления хорошо описываются в рамках стандартной модели ТКЛ.

Ключевые слова: твердотельный кольцевой лазер, спектральная невязанность, нелинейная динамика излучения, спонтанное нарушение симметрии.

1. Введение

Явления спонтанного нарушения симметрии имеют место в динамических системах самой разной природы. Так, при исследовании нелинейной динамики лазеров было обнаружено спонтанное нарушение пространственно-временных [1–4], поляризационных [5] и фазовых [6] характеристик излучения. Большинство исследований в этом направлении относится к газовым и полупроводниковым лазерам. В твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ), насколько нам известно, эти явления детально не рассматривались.

Двунаправленный ТКЛ в отсутствие оптических невязанностей кольцевого резонатора и при симметричной обратной связи встречных волн через обратное рассеяние представляет собой симметричную автоколебательную систему. В такой системе, естественно, могут существовать симметричные стационарные и нестационарные режимы генерации, в которых все характеристики встречных волн (их интенсивности, несущие частоты, спектры поля и мощности излучения) являются идентичными. Именно это имеет место в большинстве исследованных до настоящего времени режимов генерации ТКЛ (см., напр., обзоры [7, 8]). В частности, симметрия наблюдается в стационарном режиме взаимной синхронизации встречных волн, в автомодуляционных режимах первого и второго рода и в большинстве квазистационарных режимов генерации.

В определенной области параметров некоторые симметричные состояния могут стать неустойчивыми, а несимметричные состояния, напротив, – устойчивыми. В этом случае в лазере возникает бифуркация спонтанного нарушения симметрии. Несимметричные состояния можно разделить на две группы: на состояния с несимметричными интенсивностями встречных волн (как стационарными, так и нестационарными) и на состояния с не-

идентичными фазовыми характеристиками полей встречных волн. В настоящей работе будем рассматривать, в основном, состояния первого типа.

Одним из хорошо известных случаев спонтанного нарушения симметрии является возникновение однонаправленной генерации при слабой связи встречных волн через обратное рассеяние или в отсутствие такой связи. В этом случае в кольцевом лазере одновременно оказываются возможными два режима однонаправленной генерации, различающиеся направлением распространения бегущих волн [8]. Возможность реализации в эксперименте того или иного из указанных режимов определяется случайными факторами.

В настоящей работе показано, что в двунаправленном ТКЛ при периодической модуляции мощности накачки в областях параметрических резонансов между частотой модуляции и частотой автомодуляционных колебаний при определенных условиях имеет место спонтанное нарушение симметрии, приводящее к возникновению специфических квазипериодических режимов генерации, различающихся временной структурой и спектрами интенсивностей излучения встречных волн.

2. Экспериментальная установка

Исследуемый кольцевой лазер был выполнен из высококачественного кристалла $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ в виде многогранной призмы с одной сферической и тремя плоскими гранями, обеспечивающими благодаря полному внутреннему отражению существование внутри призмы замкнутой неплоской траектории для встречных световых волн [8]. Геометрический периметр кольцевого резонатора составлял 2.6 см, а угол неплоскостности – 80° . Накачка лазера осуществлялась с помощью полупроводникового лазерного диода, блок питания которого позволял не только плавно регулировать мощность накачки, но и модулировать ее в диапазоне частот $\omega_p/2\pi$ от 10 до 100 кГц. Относительная глубина модуляции h при этом могла достигать 100%. Стабильность температуры исследуемого лазера поддерживалась с точностью $\sim 0.05^\circ$.

Сигналы интенсивностей встречных волн, регистрируемые широкополосными фотоприемниками (ЛФД-2),

А.А.Камышева, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: kravtsov@npi.phys.msu.su

поступали на четырехканальный осциллограф Tektronix TDS-2014. В процессе исследований можно было одновременно регистрировать временные зависимости интенсивностей излучения встречных волн $I_{1,2}$, а также их спектры $J_{1,2}$.

3. Экспериментальные результаты

Целью проводимых исследований являлось обнаружение нарушений временной и спектральной симметрии интенсивности излучения встречных волн в отсутствие амплитудной и частотной невязимности резонатора и при симметричных коэффициентах связи через обратное рассеяние. Исследовались нестационарные режимы генерации, возникающие при периодической модуляции мощности накачки.

В отсутствие модуляции накачки в исследуемом чип-лазере существовал автомодуляционный режим первого рода, при этом амплитуды автомодуляционных колебаний интенсивностей встречных волн были равными, что свидетельствовало о симметрии коэффициентов связи. Частота автомодуляционных колебаний $\omega_m/2\pi$ была равна 180 кГц, а основная частота релаксационных колебаний $\omega_r/2\pi$ составляла 60 кГц при превышении порогового уровня накачки $\eta = 0.15$. Исследования проводились в областях нелинейных (параметрических) резонансов, когда частота модуляций накачки ω_p и частота автомодуляционных колебаний ω_m связаны соотношениями

$$n\omega_m = k\omega_p, \quad (1)$$

где $n, k = 1, 2, \dots$

Рассмотрим вначале случай параметрического резонанса при $n = 1, k = 2$. Такой резонанс имел место при изменении частоты модуляции в узкой области частот вблизи 90 кГц. В этой области при изменении глубины модуляции накачки в диапазоне $3\% < h < 15\%$ возникают бистабильные несимметричные квазипериодические режимы. Оба режима сходны друг с другом и различаются лишь направлением распространения более сильной волны. Характерные осциллограммы и спектрограммы интенсивностей встречных волн для этих режимов приведены на рис.1. В рассматриваемых режимах в спектре интенсивности преобладают дискретные эквидистантные спектральные компоненты, разделенные интервалом, равным частоте модуляции. Основной специфической особенностью этих режимов является существенное различие временных структур излучения во встречных направлениях и спектральная невязимность (спектры интенсивностей встречных волн оказываются неидентичными). Некоторое различие во временных структурах излучения в бистабильных режимах связано, по-видимому, с небольшим различием между коэффициентами связи встречных волн (оно может возникнуть, например, за счет паразитных отражений в приемном тракте) или с малой оптической невязимностью из-за влияния магнитного поля Земли.

На основе приведенных результатов можно сделать вывод, что в указанной области параметров имеет место спонтанное нарушение спектральной симметрии излучения встречных волн. Различие временной и спектральной структур излучения встречных волн можно описать также коэффициентами корреляции интенсивностей K_I и спектров интенсивностей K_ω . Для приведенных на

рис.1, а, б осциллограмм и спектрограмм $K_I = -0.26$ и $K_\omega = 0.86$.

Ширина интервала частот модуляции, в котором имеет место спонтанное нарушение спектральной невязимности, зависит от глубины модуляции накачки и превышения пороговой мощности накачки. При $h = 12\%$ и $\eta = 0.15$ квазипериодические режимы со спектральной невязимностью существуют в диапазоне частот модуляции $85 \text{ кГц} < \omega_p/2\pi < 93 \text{ кГц}$. Вне этой области наблюдаются режимы несинхронного динамического хаоса с практически идентичными во встречных направлениях спектрами излучения, для которых коэффициенты корреляции были близки к единице.

Нарушение временной и спектральной симметрии излучения встречных волн наблюдалось экспериментально и в некоторых других узких областях параметрических резонансов (например, на частотах модуляции накачки, близких к 60 и 120 кГц).

4. Результаты численного моделирования

Возможность возникновения спонтанного нарушения спектральной симметрии в областях параметрических резонансов в ТКЛ с периодической модуляцией накачки была продемонстрирована также при численном моделировании. Использовалась стандартная модель ТКЛ, которая в отсутствие оптической невязимности и при симметричных коэффициентах связи (равных модулях $m = m_1 = m_2$) и равных нулю фазах комплексных коэффициентов связи) описывается следующей системой дифференциальных уравнений для комплексных амплитуд встречных волн $E_{1,2}$ и пространственных гармоник инверсной населенности N_0, N_+ и $N_- = N_+^*$ [8]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}}{dt} &= -\frac{\omega}{2Q} E_{1,2} + \frac{i}{2} m E_{2,1} + \frac{\sigma l}{2T} [N_0 E_{1,2} + N_+ E_{2,1}], \\ T_1 \frac{dN_0}{dt} &= N_{th}(1 + \eta) - N_0 [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] \\ &\quad - N_+ a E_1 E_2^* + N_- a E_2 E_1^*, \\ T_1 \frac{dN_+}{dt} &= -N_+ [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - N_0 a E_2 E_1^*, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω/Q – ширина полосы резонатора; N_{th} – пороговая инверсная населенность; $T = L/c$ – время обхода резонатора светом; L – длина периметра кольцевого резонатора; l – длина активного элемента; $a = T_1 c \sigma / (8 \hbar \omega \pi)$ – параметр насыщения; T_1 – время релаксации инверсной населенности; σ – сечение лазерного перехода; η – превышение мощности накачки над порогом. Здесь мы предполагаем, что лазер генерирует на частоте, совпадающей с центром линии люминесценции.

Параметры выбирались близкими к параметрам исследуемого кольцевого чип-лазера: $\omega_m/2\pi = 170 \text{ кГц}$, $\eta = 0.15$, потери излучения за проход по резонатору полагались равными 4%, что при данном значении η соответствовало частоте релаксационных колебаний $\omega_r/2\pi = 61.7 \text{ кГц}$.

Приведем результаты численного моделирования для параметрического резонанса (1) при $n = 1, k = 2$. При глубине модуляции накачки $h = 5\%$ бистабильные режимы с неидентичными временной и спектральной структурами излучения во встречных направлениях наблю-

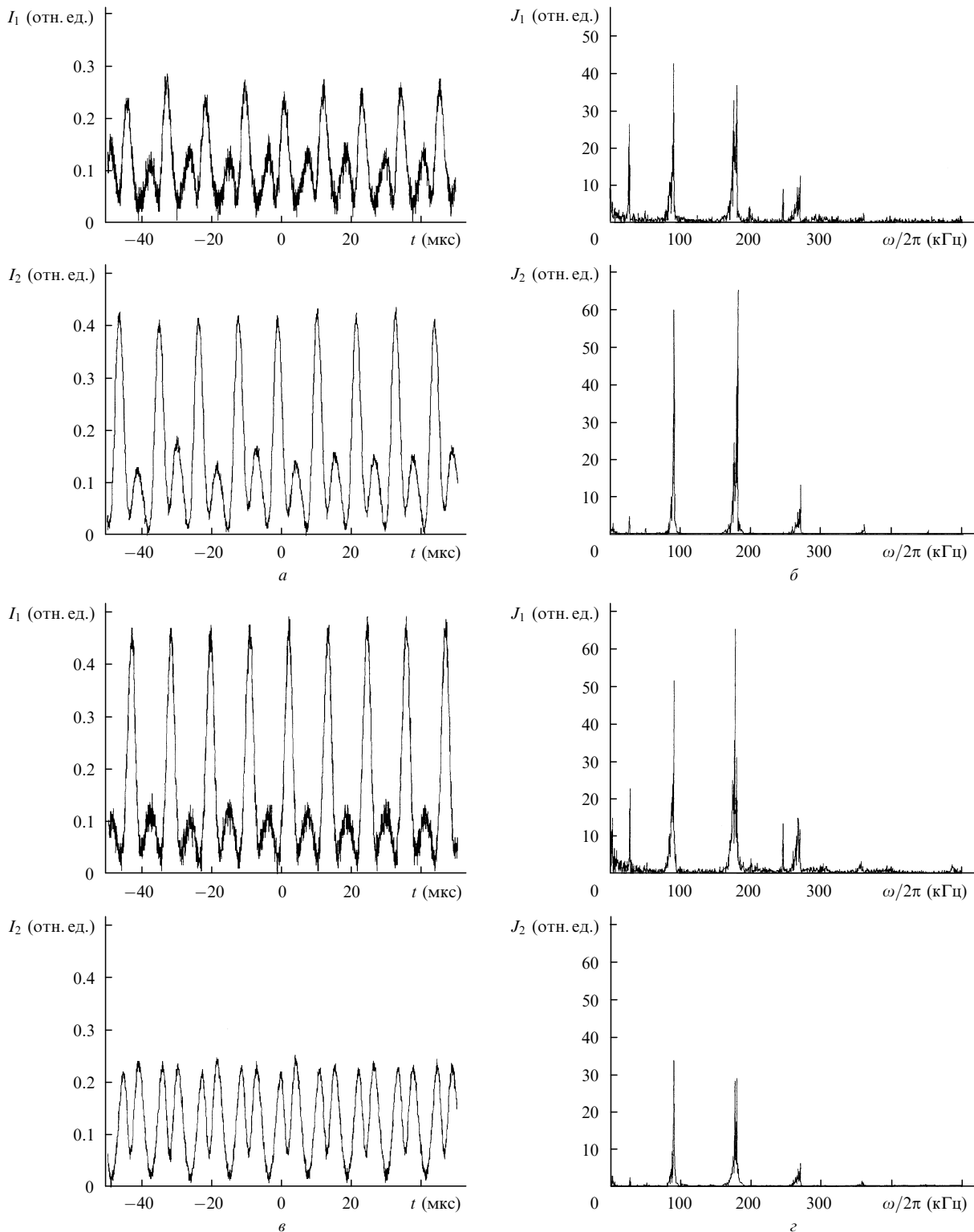


Рис. 1. Осциллограммы интенсивностей встречных волн $I_{1,2}$ (а, в) и спектры интенсивностей $J_{1,2}$ (б, г) в бистабильных режимах генерации со спонтанным нарушением спектральной симметрии при $\eta = 0.15$, $h = 8\%$ и $\omega_p/2\pi = 90$ кГц.

дались в интервале частот модуляции $86.3 \text{ кГц} < \omega_p/2\pi < 88.2 \text{ кГц}$. Для одного из этих режимов временные и спектральные характеристики излучения встречных волн показаны на рис.2. В другом бистабильном режиме имеют место те же временные и спектральные характеристики, но для волн, распространяющихся в противоположном направлении. Вне области спонтанного нарушения симметрии устанавливаются режимы с симметричными спектрами интенсивностей встречных волн: при

$\omega_p/2\pi > 88.2 \text{ кГц}$ возникает квазисинусоидальный режим генерации QS-I [7], а при $\omega_p/2\pi < 86.3 \text{ кГц}$ – режим несинхронного динамического хаоса. Для указанных режимов генерации проекции фазовых портретов на плоскость (I_1, I_2) показаны на рис.3. Видно, что в режиме QS-I распределения интенсивностей излучения во встречных направлениях являются симметричными, тогда как в квазипериодическом режиме со спонтанным нарушением спектральной симметрии аналогичные распределения

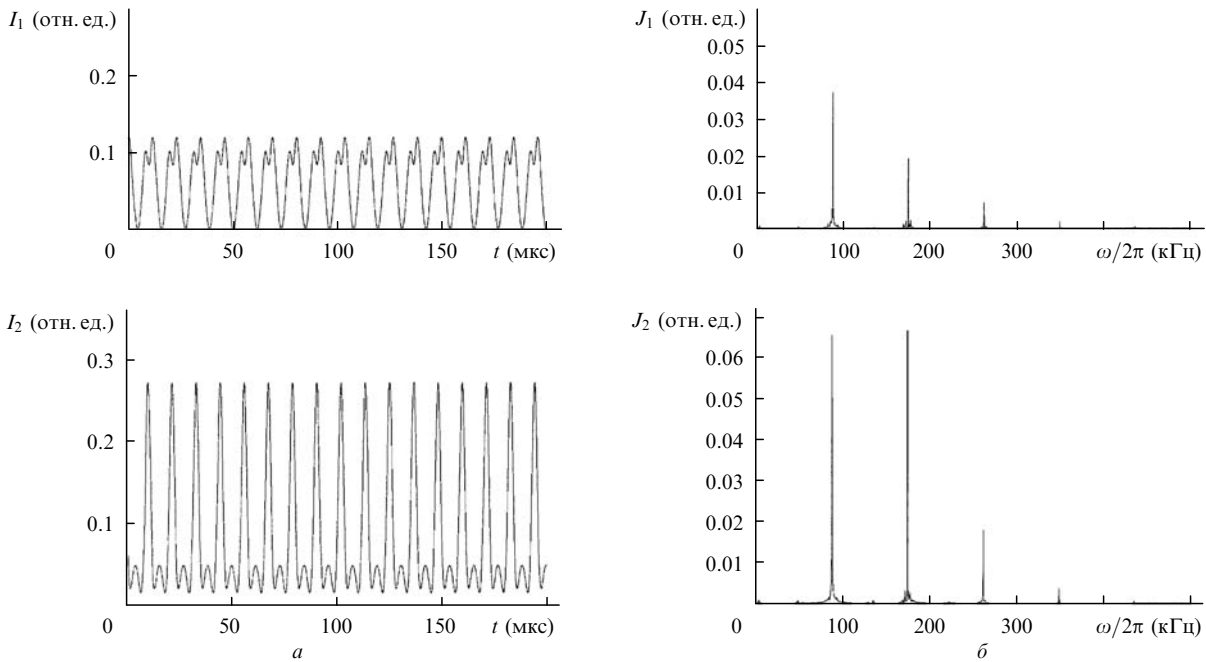


Рис.2. Временные зависимости интенсивностей встречных волн $I_{1,2}$ (а) и спектры $J_{1,2}$ (б) в одном из бистабильных режимов генерации, полученные в результате численного моделирования при $\eta = 0.15$, $h = 5\%$ и $\omega_p/2\pi = 87$ кГц.

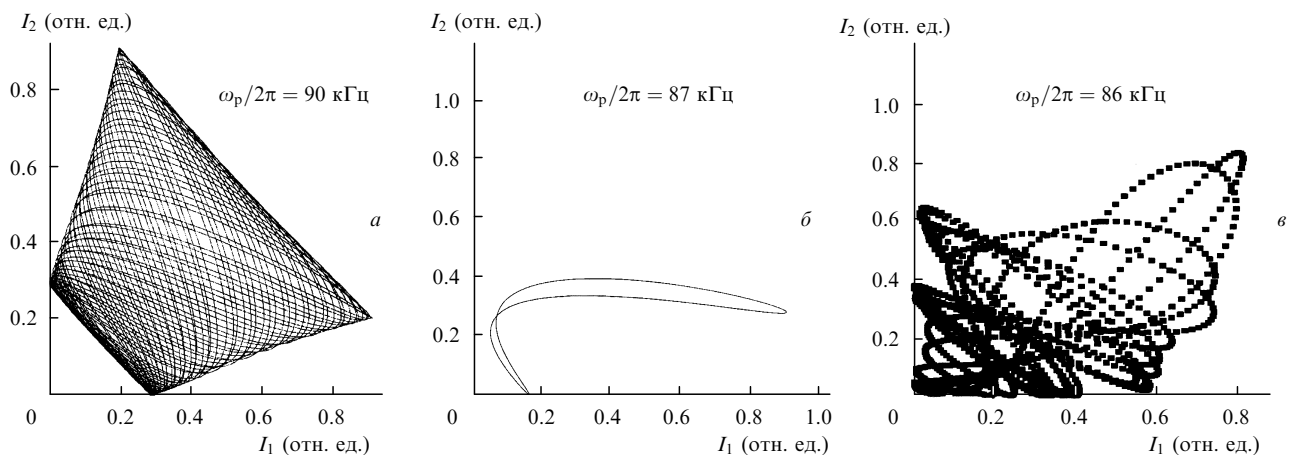


Рис.3. Проекция фазовых портретов на плоскость (I_1, I_2) , полученные в результате численного моделирования при $\eta = 0.15$, $h = 5\%$ и различных значениях $\omega_p/2\pi$.

существенно несимметричны. В режиме несинхронного хаоса также имеет место асимметричное распределение интенсивностей, однако спектры интенсивностей практически идентичны.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе экспериментально и теоретически продемонстрирована новая возможность спонтанного нарушения симметрии временной и спектральной структур излучения в ТКЛ с периодической модуляцией накачки. Нарушение симметрии имеет место в областях параметрических резонансов между частотой модуляции накачки и частотой автомодуляционных колебаний. В результате спонтанного нарушения симметрии в ТКЛ в указанных областях возникают бистабильные квазипериодические режимы генерации с неидентичной временной и спектральной структурами излучения во встречных направлениях, а также с неравными средними значениями интенсивностей встречных волн.

Сравнение экспериментальных результатов с результатами численного моделирования показало, что рассматриваемые явления хорошо описываются в рамках стандартной модели твердотельного кольцевого лазера.

Авторы благодарны В.В.Фирсову за помощь при проведении экспериментов.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 05-02-16008 и 04-02-16532).

- Green C., Mindlin G.B., D'Angelo E.J., Solari H.G., Tredicce J.R. *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 3124 (1990).
- Terry J.R. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, **1**, 245 (1999).
- Рубин П.Л., Блок Ф.Я., Виттеман В.Я. *Квантовая электроника*, **30**, 555 (2000).
- Heil T., Fischer I., Elsasser W., Mulet J., Mirasso C.R. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 795 (2001).
- Svirina L.P. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, **3**, S133 (2001).
- Skryabin D.V., Vladimirov A.G., Radin A.M. *Opt. Commun.*, **116**, 109 (1995).
- Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 487 (2004).
- Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 192 (2006).