

# Эволюция нестационарных режимов генерации монолитных кольцевых лазеров

Н.В.Кравцов, С.Н.Чекина

*Экспериментально исследована эволюция областей существования и устойчивости квазипериодических и хаотических режимов генерации в монолитном кольцевом Nd:YAG-лазере, происходящая при изменении мощности накачки. Показано, что режим динамического хаоса, возникающий при модуляции мощности накачки, перемежается окнами, в которых имеют место различные квазипериодические режимы генерации. Рассмотрен сценарий перехода от автомодуляционного режима генерации к режиму динамического хаоса.*

**Ключевые слова:** кольцевой твердотельный лазер, нелинейная динамика, динамический хаос, нестационарные процессы.

## 1. Введение

Высокостабильные монолитные кольцевые Nd:YAG-лазеры с полупроводниковой накачкой (кольцевые чип-лазеры) в настоящее время широко используются как при фундаментальных исследованиях в области лазерной физики, так и в лазерной технике. Практика показывает, что функциональные возможности таких лазеров далеко не исчерпаны, поэтому неудивителен тот интерес, который проявляется в настоящее время к исследованиям нелинейной динамики излучения таких лазеров, позволяющий глубже понять тонкости взаимодействия оптических волн в усиливающей среде.

Одной из недостаточно исследованных областей являются квазипериодические и хаотические режимы, возникающие в кольцевых лазерах при наличии внешних периодических воздействий. Этому вопросу посвящено значительное число публикаций [1–12], но, тем не менее, ряд практических важных задач все еще ждет своего решения. К числу таких задач следует, в частности, отнести исследование эволюции областей существования различных квазипериодических и хаотических режимов генерации в монолитных кольцевых чип-лазерах в зависимости от превышения пороговой мощности накачки.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований особенностей нелинейной динамики излучения монолитных кольцевых Nd:YAG-лазеров в нестационарных режимах генерации и условий возникновения квазипериодических и хаотических режимов генерации; рассмотрена также эволюция этих режимов при изменении управляющих параметров в широких пределах.

## 2. Экспериментальная установка

Использовалась экспериментальная установка, аналогичная описанной в [12]. Исследуемый кольцевой лазер был выполнен из высококачественного кристалла

Н.В.Кравцов, 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.ru

Поступила в редакцию 15 июня 2004 г.

YAG: Nd<sup>3+</sup> в виде многогранной призмы с одной сферической гранью и тремя гранями, обеспечивающими благодаря полному внутреннему отражению существование внутри призмы замкнутой неплоской траектории для встречных световых волн. Геометрический периметр кольцевого резонатора составлял 2.6 см, а угол неплоскости – 80°. Накачка лазера осуществлялась с помощью лазерного диода, блок питания которого позволял не только плавно регулировать мощность накачки, но и модулировать ее в широком диапазоне частот  $\omega_p/2\pi$  (от 10 до 90 кГц). Амплитуда модуляции  $h$  при этом могла достигать 100%. Стабильность температуры исследуемого лазера поддерживалась с точностью  $\sim 0.05^\circ$ .

Излучения встречных волн и сигнал, получаемый при их фотосмещении, поступали на широкополосные фотоприемники ЛФД-2, а затем на четырехканальный осциллограф Tektronix TDS-2014. В процессе исследований можно было одновременно регистрировать интенсивности излучения встречных волн  $I_{1,2}$ , их спектры  $J_{1,2}$  и сигнал фотосмещения  $I_{\text{mix}}$ .

## 3. Экспериментальные результаты

В исследуемом лазере связь встречных волн была симметричной (модули коэффициентов связи встречных волн  $|m_1| = |m_2| = |m|$ ), и в отсутствие модуляции накачки в чип-лазере существовал автомодуляционный режим первого рода. Величина  $|m|$ , определенная по частоте автомодуляционных колебаний  $\omega_a/2\pi$ , составляла 180 кГц, а частота релаксационных колебаний  $\omega_r/2\pi = (\omega\eta/QT_1)^{1/2}$  (где  $Q$  – добротность резонатора, а  $T_1$  – время релаксации метастабильного уровня), зависящая от потерь резонатора, при  $\eta = 0.1$  была равна 90 кГц.

При фиксированной глубине модуляции накачки в области  $h = 20\% - 70\%$  в узком диапазоне малых частот модуляции ( $\omega_p/2\pi \leq 5$  кГц) в лазере имел место автомодуляционный квазисинусоидальный режим генерации с низкочастотной модуляцией интенсивности (QS-1-режим генерации). Спектр излучения в этом случае состоял из двух компонент с частотами  $\omega_p/2\pi$  и  $\omega_a/2\pi$ . При увеличении частоты модуляции до некоторого критического значения, зависящего от глубины модуляции и равного примерно 5 кГц, в лазере возникал режим динамического

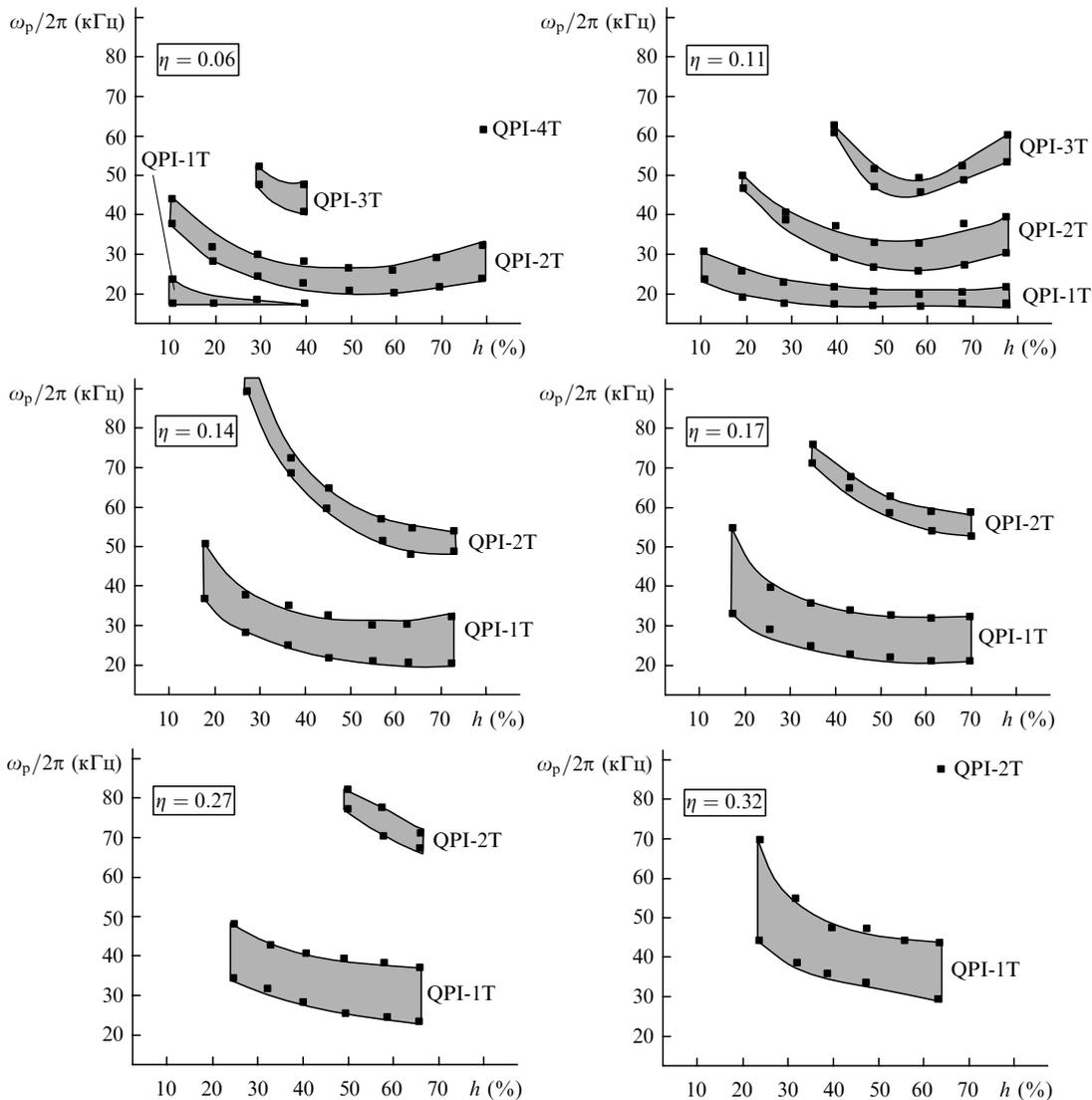


Рис.1. Границы областей существования квазипериодических и хаотических режимов генерации в плоскости  $(\omega_p/2\pi, h)$  при различных превышениях накачки над порогом  $\eta$ .

хаоса, который прерывался областями существования квазипериодических режимов, различающихся частотой следования импульсов излучения. С увеличением частоты модуляции сначала возникал режим, при котором частота следования квазипериодических импульсов была равна  $\omega_p/2\pi$ , затем режим с частотой следования квазипериодических импульсов  $\omega_p/4\pi$  и т. д. (согласно классификации, предложенной в [13], в лазере возникали QPI-1T-, QPI-2T-, QPI-3T- и QPI-4T-режимы генерации).

Границы областей существования квазипериодических и хаотических режимов генерации в плоскости  $(\omega_p/2\pi, h)$  при различных превышениях накачки над порогом  $\eta$  представлены на рис.1. Область существования квазисинусоидального режима генерации, расположенная вблизи оси  $h$ , не показана. Видно, что в исследованном диапазоне управляющих параметров ( $3 \text{ кГц} \leq \omega_p/2\pi \leq 90 \text{ кГц}$ ,  $0 \leq h \leq 100\%$ ,  $0.05 \leq \eta \leq 0.35$ ) существуют четыре окна, в которых имеют место QPI-1T-, QPI-2T-, QPI-3T- и QPI-4T- режимы генерации.

При увеличении значения  $\eta$  окна, в которых существуют квазипериодические режимы генерации, смещаются в области значительно более высоких частот модуляции  $\omega_p/2\pi$ . Так, например, если при  $\eta = 0.11$  и  $h = 40\%$  возникновение QPI-2T-режима возможно при частотах

модуляции, лежащих в пределах 35–40 кГц, то при  $\eta = 0.17$  возбуждение этого режима при той же глубине модуляции возможно только при частотах модуляции 70–75 кГц. Ширины областей существования квазипериодических режимов генерации в плоскости  $(\omega_p/2\pi, h)$ , как показывает эксперимент, не превышают 20 кГц, причем наиболее широкой оказывается область существования QPI-1T-режима, а наиболее узкой – QPI-4T-режима. Из полученных результатов следует, что в плоскости  $(\omega_p/2\pi, h)$  расстояние между окнами существования квазипериодических режимов растет с увеличением превышения порога генерации

Характерные осциллограммы интенсивности излучения встречных волн и сигнала фотосмешения, возникающих в QPI-2T-режиме генерации при  $\omega_p/2\pi = 59 \text{ кГц}$ ,  $\eta = 0.06$  и  $h = 30\%$ , приведены на рис.2. Осциллограммы встречных волн и сигнала фотосмешения в других квазипериодических режимах имеют аналогичный вид. Заметим, что характер сигнала фотосмешения встречных волн  $I_{\text{mix}}$  позволяет получить информацию об их фазовых соотношениях. Анализ осциллограмм сигналов фотосмешения, полученных в QPI-1T, QPI-2T- и QPI-3T-режимах, позволяет сделать вывод об изменении разности фаз встречных волн в промежутке между соседними

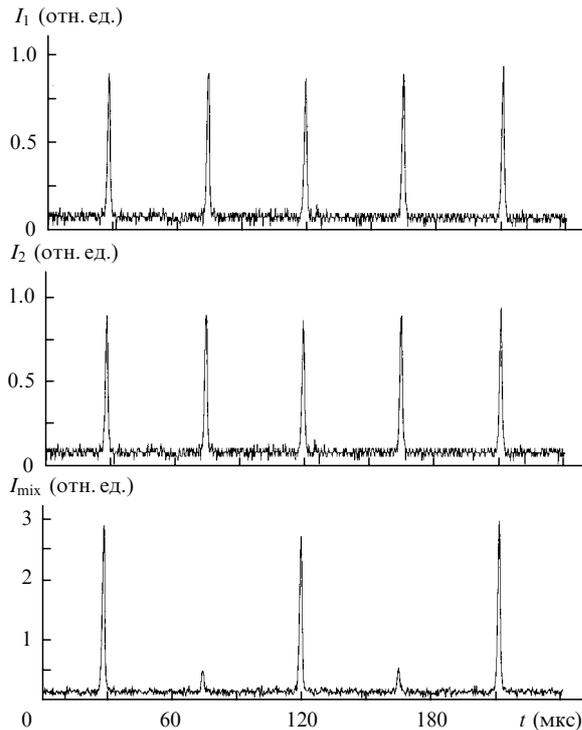


Рис.2. Фрагмент осциллограммы интенсивностей излучения встречных волн и сигнала фотосмещения в квазипериодическом режиме генерации при  $\omega_p/2\pi = 45$  кГц,  $\eta = 0.11$  и  $h = 25\%$ .

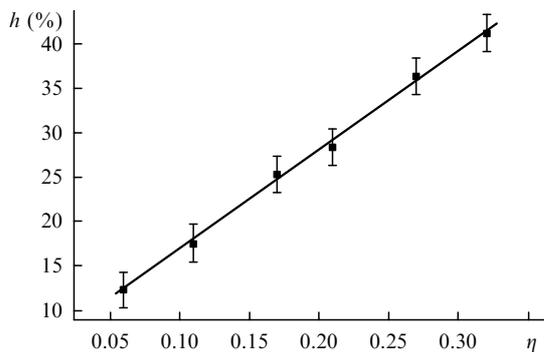


Рис.3. Зависимость необходимой для возникновения QPI-2T-режима глубины модуляции накачки от величины  $\eta$ .

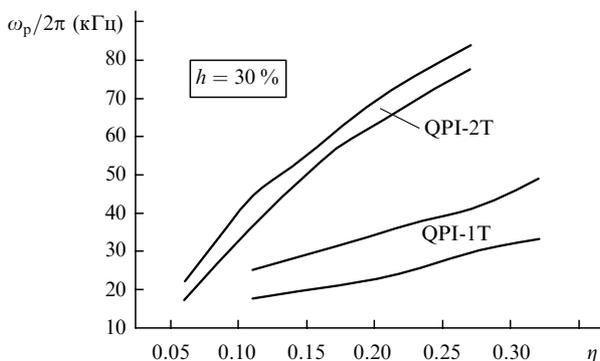


Рис.4. Взаимное расположение областей существования режимов генерации QPI-1T и QPI-2T в плоскости  $(\omega_p/2\pi, \eta)$  при  $h = 30\%$ .

импульсами во всех наблюдаемых квазипериодических режимах генерации. Заметим, что ранее уже отмечалась возможность возникновения скачков оптических фаз встречных волн на  $\pi$  в режиме генерации QPI-1T [12, 13].

Полученные результаты показывают, что в исследованном диапазоне частот модуляции средние частоты окон, в которых существуют квазипериодические режимы QPI-1T и QPI-2, практически линейно зависят от превышения порогового уровня накачки. В качестве примера на рис.3 показана необходимая для возникновения QPI-2T-режима глубина модуляции накачки в зависимости от величины  $\eta$ . Взаимное расположение областей существования QPI-1T- и QPI-2T- режимов генерации в плоскости  $(\omega_p/2\pi, \eta)$  при  $h = 30\%$  представлено на рис.4.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведены детальные исследования нестационарных режимов генерации высокостабильного монолитного кольцевого Nd:YAG-чип-лазера при гармонической модуляции мощности накачки. Продемонстрирована возможность возникновения в области динамического хаоса окон, в которых имеют место квазипериодические режимы с частотами, различающимися в четыре раза (режимы QPI-1T и QPI-4T). Определены области существования этих квазипериодических режимов в зависимости от таких управляющих параметров, как превышения порогового уровня накачки, частоты и глубины модуляции мощности накачки. Исследована эволюция областей существования и устойчивости квазипериодических и хаотических режимов генерации, происходящая при изменении мощности накачки. Рассмотрен сценарий перехода от автомодуляционного режима первого рода к режиму динамического хаоса.

Показано, что поведение областей существования исследованных режимов сильно зависит от величины управляющих параметров. Рассмотренные особенности поведения автоколебательной системы (каковой является кольцевой лазер) могут оказаться полезными не только для лазерной физики, но и для других областей нелинейной динамики.

Авторы благодарны Е.Г.Ларионцеву за полезные обсуждения результатов, а также Н.И.Наумкину и В.В.Фирсову за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-16008).

1. Thornburg K.S., Moller M., Roy R. *Phys. Rev. E*, **55**, 3865 (1997).
2. Uchida A., Ogawa T., Shinozuka M., Kannari F. *Phys. Rev. E*, **62**, 1960 (2000).
3. DeShazer D., Breban R., Ott E., Roy R. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 044101(4) (2001).
4. Krauskopf B., Wiczorek S., Lenstra D. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 1611 (2000).
5. Roy R., Thornburg K.S. *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 2009 (1994).
6. Thornburg K.S., Moller M., Roy R. *Phys. Rev. E*, **55**, 3865 (1997).
7. Алешин Д.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 7 (2002).
8. Moller M., Forsmann V., Jansen M.J. *Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, **2**, 371 (2000).
9. Кравцов Н.В., Пашинин П.П., Сидоров С.С., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **33**, 321 (2003).
10. Кравцов Н.В., Пашинин П.П., Сидоров С.С., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **34**, 329 (2004).
11. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Наумкин Н.И., Чекина С.Н., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **32**, 251 (2002).
12. Котомцева Л.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **32**, 654 (2002).
13. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 487 (2004).