

# Возбуждение динамического хаоса в монолитном кольцевом лазере при периодической модуляции механических напряжений в активном элементе

Н.В.Кравцов, С.С.Сидоров, П.П.Пащинин, В.В.Фирсов, С.Н.Чекина

*Теоретически и экспериментально исследованы особенности нелинейной динамики твердотельных двунаправленных кольцевых чип-лазеров на  $YAG: Nd^{3+}$  при периодической модуляции механических напряжений в активном элементе. Показано, что модуляция механических напряжений является весьма эффективным способом возбуждения режима динамического хаоса в монолитном чип-лазере.*

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

## 1. Введение

В последнее время значительное внимание уделяется изучению нелинейных автоколебательных процессов и динамического хаоса в твердотельных лазерах. Такие исследования представляют несомненный интерес как с точки зрения развития самой лазерной физики, так и для решения целого ряда прикладных задач. Основные усилия при этом сосредоточены на исследованиях условий возникновения динамического хаоса в оптически связанных одномодовых лазерах [1–5], в лазерах, генерирующих на ортогонально поляризованных модах [6–9], и в кольцевых лазерах [10–13].

Среди перечисленных объектов исследования наиболее интересными (и, по-видимому, наиболее сложными) являются, на наш взгляд, кольцевые двунаправленные лазеры. Хорошо известно, что кольцевые твердотельные лазеры обладают весьма сложной нелинейной динамикой, возникающей вследствие конкурентного взаимодействия встречных волн в активной среде на наведенной решетке инверсной населенности и их связи через обратное рассеяние. Это приводит к возникновению в таких лазерах множества режимов генерации, в том числе различных специфических автоколебательных режимов. Немаловажную роль в многообразии режимов генерации кольцевых лазеров играют также амплитудная и частотная невязанности кольцевого резонатора [14, 15].

Одними из наиболее интересных режимов генерации, существующих в кольцевых твердотельных двунаправленных лазерах, являются режимы динамического хаоса, которые, как правило, возбуждаются при внешней модуляции параметров лазера. В отсутствие внешней модуляции режимы динамического хаоса в двунаправленном кольцевом лазере могут возникать в условиях параметрических резонансов [16], однако их реализация в автономных кольцевых лазерах (в отличие от неавтономных)

часто оказывается весьма сложной. Отметим, что некоторые признаки хаотических колебаний имеют место и при возбуждении автомодуляционного режима второго рода [17].

Детальные исследования нелинейной динамики возможны только при высокой стабильности параметров исследуемого лазера. Наиболее просто высокая стабильность достигается при использовании в качестве исследуемого объекта термостабилизированного монолитного кольцевого чип-лазера с полупроводниковой накачкой. Поскольку в резонатор такого лазера нельзя ввести управляющие элементы, возможности управления его режимами генерации значительно ограничиваются. Практически во всех экспериментальных работах при исследовании нелинейной динамики монолитных кольцевых чип-лазеров в качестве управляющего параметра используется только мощность накачки. Использование же в качестве управляющего параметра переменного магнитного поля ограничено трудностями получения значительных напряженностей поля на высоких (100–200 кГц) частотах.

В настоящей работе исследована еще одна возможность возбуждения в монолитных кольцевых чип-лазерах квазипериодических и хаотических режимов генерации, основанная на модуляции механических напряжений в активном элементе лазера. Периодическое изменение механических напряжений ведет к модуляции сразу нескольких параметров лазера: показателя преломления активного элемента, отстройки частоты генерации от центра линии усиления, длины резонатора, а также его потерь, связанных с возникновением двулучепреломления в поляризационно-анизотропном резонаторе. Как показали исследования, наиболее существенное влияние на характер генерации лазера в этом случае оказывает модуляция последнего из перечисленных параметров.

## 2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.1. Исследовался высокостабильный монолитный кольцевой чип-лазер 1 на  $YAG: Nd^{3+}$  ( $\lambda = 1.06$  мкм) с полупроводниковой накачкой. Периметр резонатора кольцевого лазера составлял 2.6 см, угол не-

Н.В.Кравцов, В.В.Фирсов, С.Н.Чекина. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына при МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы  
С.С.Сидоров, П.П.Пащинин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 1 декабря 2003 г.

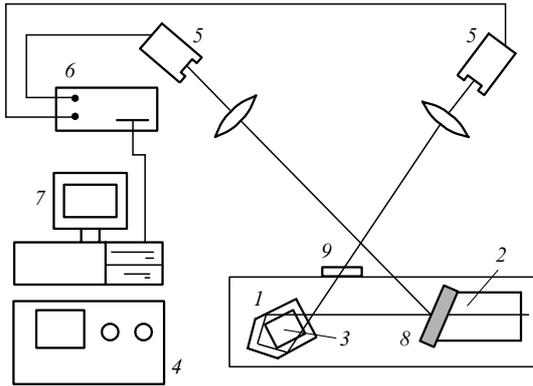


Рис.1. Принципиальная схема установки:

1 – монолитный кольцевой чип-лазер; 2 – полупроводниковый лазерный диод; 3 – пьезоэлемент; 4 – генератор переменного напряжения; 5 – фотоприемник ЛФД-2; 6 – цифровой осциллограф АСК-3151; 7 – компьютер; 8 – селективное зеркало; 9 – ИКС-светофильтр.

плоскости был равен  $80^\circ$ . Накачка осуществлялась по продольной схеме излучением лазерного диода 2 ( $\lambda = 0.81$  мкм) с выходной мощностью до 500 мВт. Более подробно конструкция лазера описана в [18].

Кристалл чип-лазера был жестко связан с пьезокерамической пластиной 3 и помещен в металлизированную оболочку. На пьезоэлемент подавалось переменное напряжение от генератора 4. Юстировка активного элемента относительно оси пучка накачки позволяла в небольших пределах изменять значения автомодуляционной ( $\omega_m/2\pi$ ) и основной релаксационной ( $\omega_r/2\pi$ ) частот. Амплитуда напряжения  $U$  на пьезоэлементе (изменявшаяся от нуля до 20 В) определяла глубину модуляции  $h$  механических напряжений в активном элементе. Модуляция осуществлялась в диапазоне частот  $\omega_p/2\pi$  от 10 до 160 кГц. Лазерное излучение поступало на фотоприемники 5 (ЛФД-2), а затем на цифровой осциллограф 6 (АСК-3151) и обрабатывалось с помощью компьютера 7. В процессе эксперимента регистрировались временные и спектральные характеристики встречных волн двунаправленного ТКЛ. Обработка экспериментальных результатов позволяла получать проекции фазовых портретов.

### 3. Эксперимент

Экспериментально исследовались эволюция режимов генерации монолитного кольцевого чип-лазера на  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$  при изменении механических напряжений в активном элементе и сценарий перехода в режим динамического хаоса. В отсутствие модуляции ( $U = 0$ ) лазер работал в характерном для кольцевых лазеров автомодуляционном режиме первого рода. Интенсивности встречных волн были равными, а их спектр состоял из одной компоненты с частотой автомодуляционных колебаний  $\omega_m/2\pi$ , составляющей 145 кГц; основная релаксационная частота  $\omega_r/2\pi$  при превышении порогового уровня накачки  $\eta = 0.16$  равнялась 65 кГц.

При подаче на пьезоэлемент переменного управляющего напряжения ( $U \neq 0$ ) возникал режим квазисинусоидальных колебаний, при котором огибающие интенсивностей встречных волн, в свою очередь, были промодулированы с частотой  $\omega_p/2\pi$ , а в спектре возникала дополнительная компонента с той же частотой. С увеличе-

нием  $U$  (увеличением глубины модуляции) до некоторого критического значения  $U_{cr}$  режим квазипериодических колебаний сменялся режимом динамического хаоса. В случае, когда круговая частота модуляции  $\omega_p$  удовлетворяла условию параметрических резонансов  $k\omega_m = m\omega_r + n\omega_p$  ( $k, m, n$  – целые числа), значения управляющего напряжения  $U_{cr}$  на пьезоэлементе были минимальными.

В процессе эксперимента было отмечено, что наиболее легко (т.е. при меньшей глубине модуляции) переключение режимов генерации и переход в режим хаотических пульсаций происходит в области частот  $60 < \omega_p/2\pi < 90$  кГц, что, по-видимому, объясняется наличием в этом диапазоне собственных резонансных частот системы кристалл – пьезоэлемент – корпус, позволяющих достаточно легко реализовать условие основного параметрического резонанса  $\omega_m = \omega_r + \omega_p$  ( $\omega_m = 145$  кГц,  $\omega_p = 80$  кГц,  $\omega_r = 65$  кГц). Минимальная амплитуда напряжения на пьезоэлементе  $U_{cr}^{min}$ , при которой возникает режим динамического хаоса, в указанном диапазоне частот составила 3 В.

На рис.2 приведены осциллограммы интенсивностей  $I_{1,2}(t)$ , спектры встречных волн и фазовый портрет в плоскости ( $I_1, I_2$ ) в условиях параметрического резонанса  $\omega_m = \omega_r + \omega_p$  и при  $\eta = 0.16$ ,  $U = 15$  В. Видно, что временные зависимости интенсивностей встречных волн

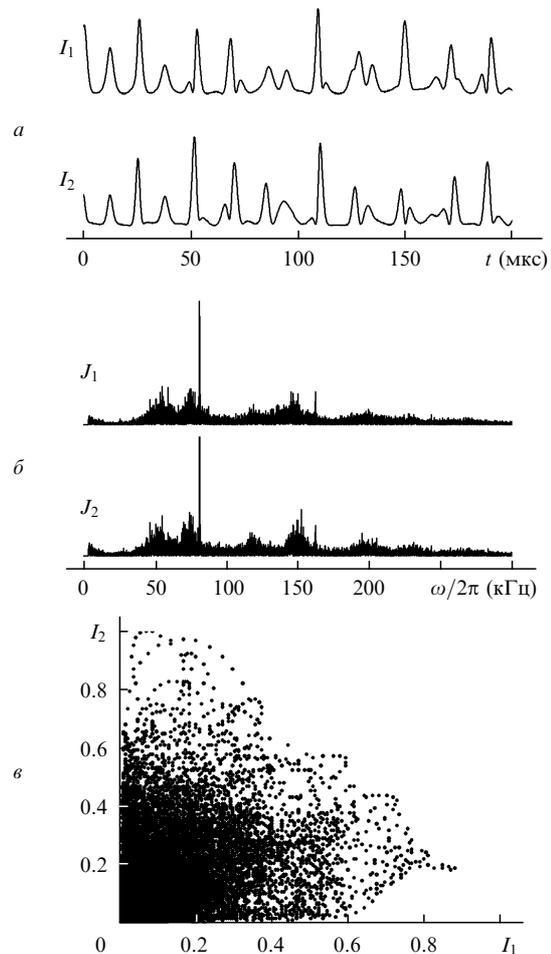


Рис.2. Осциллограммы интенсивностей встречных волн  $I_1, I_2$  (а), их спектры (б) и проекция фазовой траектории на плоскость ( $I_1, I_2$ ) (в) в случае параметрического резонанса  $\omega_m = \omega_r + \omega_p$  при  $\omega_m = 145$  кГц,  $\omega_p = 80$  кГц,  $\omega_r = 65$  кГц,  $\eta = 0.16$  и  $U = 15$  В.

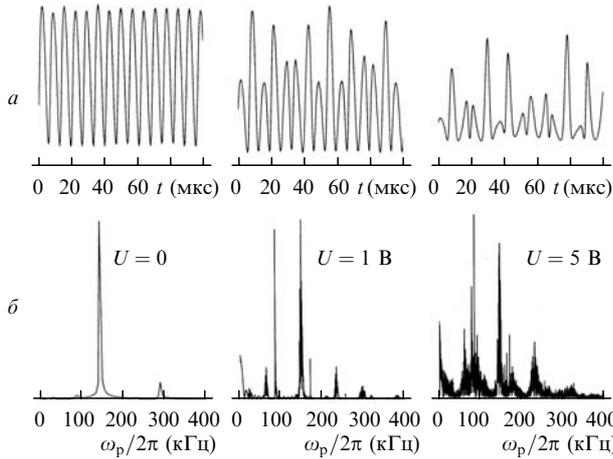


Рис.3. Зависимости временных (а) и соответствующих им спектральных (б) характеристик излучения одной из встречных волн кольцевого чип-лазера от величины управляющего параметра (напряжения на пьезоэлементе) при  $\omega_m = 165$  кГц,  $\omega_p = 84$  кГц,  $\omega_r = 84$  кГц и  $\eta = 0.4$ .

представляют собой последовательности пиков с хаотически изменяющимися амплитудами и временными промежутками между ними. Коэффициент корреляции  $K$  интенсивностей встречных волн в этом случае составляет 0.43. Спектры излучений встречных волн являются практически сплошными с максимумами в окрестностях частот  $\omega_r$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_m$ . Исследования показали, что ширина области параметрического резонанса пропорциональна глубине модуляции механических напряжений, и для лазера, осциллограммы которого показаны на рис.2, при управляющем напряжении  $U = 5$  В она составляет  $\sim 3$  кГц, а при  $U = 15$  В – около 6 кГц. Полученные результаты (временные характеристики, спектры излучения и проекция фазовой траектории на плоскость  $(I_1, I_2)$ ) свидетельствуют о возбуждении в кольцевом лазере динамического хаоса.

Сценарий перехода к режиму динамического хаоса при  $\omega_m = 165$  кГц,  $\omega_p = 84$  кГц,  $\omega_r = 84$  кГц и  $\eta = 0.4$  показан на рис.3, на котором приведены осциллограммы интенсивностей излучения одной из встречных волн, полученные при изменении управляющего параметра (увеличении  $U$ ), и соответствующие им спектры. Видно, что с ростом напряжения режим гармонических колебаний сначала сменяется квазипериодическим, который при достижении значения  $U_{cr}$  теряет устойчивость и переходит в режим динамического хаоса. Подобную эволюцию режимов генерации принято называть квазипериодическим сценарием (сценарий Рюэля – Такенса) перехода к хаосу (см., напр., [19]). Заметим, что такой сценарий наблюдался в [20].

#### 4. Численное моделирование

При расчетах использовалась стандартная модель твердотельного кольцевого лазера, описываемая следующей системой уравнений [21]:

$$\frac{dE_{1,2}}{dt} = -\frac{\omega}{2Q} E_{1,2} + \frac{im}{2} E_{2,1} + \frac{\sigma L}{2T} (N_0 E_{1,2} + N_{\pm} E_{2,1}),$$

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

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

$$N_0 = \frac{1}{L} \int_0^L N dz, \quad N_{\pm} = \frac{1}{L} \int_0^L N \exp(\pm i2kz) dz, \quad N_- = N_+^*,$$

где  $N_{th}$  – пороговая инверсная населенность;  $\omega$  – оптическая частота генерации чип-лазера;  $Q$  – добротность резонатора;  $m$  – коэффициент связи встречных волн;  $L$  – геометрическая длина периметра кольцевого резонатора;  $T = nL/c$  – время обхода светом резонатора;  $n$  – показатель преломления активной среды;  $\eta$  – превышение мощности накачки над порогом;  $\sigma$  – сечение резонансного перехода;  $a$  – параметр насыщения.

Ширина полосы резонатора  $\rho$  может быть записана в следующем виде:

$$\rho = \frac{\omega}{Q} = \frac{1 - R}{T},$$

где  $1 - R$  – потери в резонаторе. Механическое напряжение, действующее на активный элемент лазера, приводит к возникновению в изотропном кристалле двулучепреломления. В случае анизотропного резонатора это является причиной возникновения дополнительных потерь для генерируемой моды. Вследствие модуляции механических напряжений с помощью пьезоэлемента изменяются как  $T$ , так и  $R$  (причем анализ показывает, что влияние изменения  $R$  оказывается значительно большим, чем изменения  $T$ ), поэтому в рассматриваемом случае

$$\rho = \rho_0(1 + h \cos \omega_p t),$$

где  $\rho_0$  – ширина полосы резонатора в отсутствие модуляции.

Расчет проводился в предположении комплексно-сопряженных коэффициентов связи встречных волн. Предполагалось также, что частота генерации  $\omega$  совпадает с центром линии усиления  $\omega_0$ . Проведенные ранее исследования автомодуляционного режима показали, что эти допущения хорошо выполняются в реальных кольцевых чип-лазерах: в монолитных чип-лазерах коэффициенты связи близки к комплексно-сопряженным, а относительная отстройка частоты генерации, как правило, мала.

При численном моделировании были использованы параметры экспериментально исследованного кольцевого чип-лазера. Частота модуляции  $\omega_p$  бралась равной 80 кГц, а глубина модуляции  $h$  варьировалась  $2 \times 10^{-2} \%$  до  $8 \times 10^{-2} \%$ . К сожалению, зависимость  $h(U)$  измерить с высокой точностью в эксперименте не удалось. Проведенные расчеты показали, что максимальное согласие с экспериментом имеет место при  $h = 5 \times 10^{-2} \%$ .

На рис.4 приведены результаты расчета временных зависимостей и спектров встречных волн при  $\omega_m = 145$  кГц,  $\omega_p = 84$  кГц,  $\omega_r = 64$  кГц,  $\eta = 0.16$ ,  $h = 5 \times 10^{-2} \%$ . Эти параметры близки к экспериментальным (см. рис.2). Видно, что результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

#### 5. Заключение

Таким образом, проведенные в настоящей работе экспериментальные исследования продемонстрировали возможность переключения режимов генерации и воз-

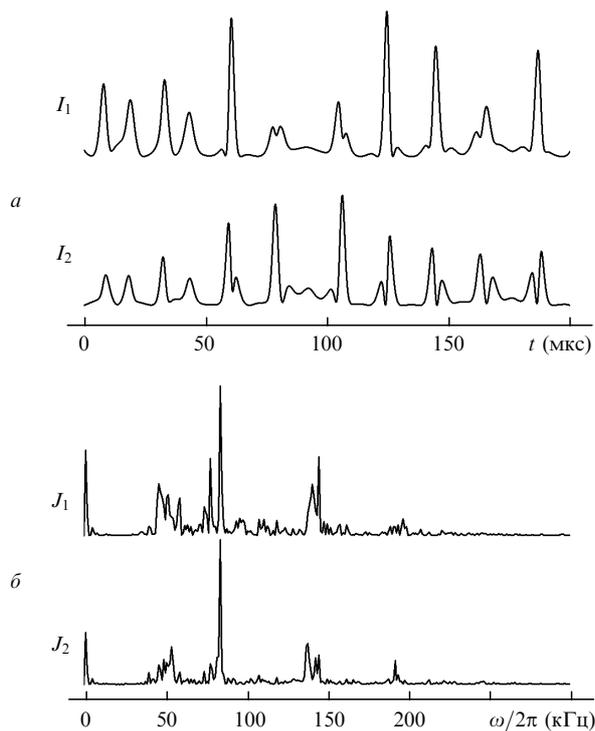


Рис.4. Расчетные характеристики кольцевого чип-лазера: интенсивности встречных волн  $I_1$  и  $I_2$  (а) и их спектры (б) при  $\omega_m = 145$  кГц,  $\omega_p = 84$  кГц,  $\omega_r = 64$  кГц,  $\eta = 0.16$  и  $h = 5 \times 10^{-2} \%$ .

буждения динамического хаоса в монолитном кольцевом чип-лазере при модуляции механических напряжений в активном элементе. Показано, что переход к режиму динамического хаоса происходит по сценарию Рюэля–Такенса. Сопоставление экспериментальных результатов с данными численного моделирования на основе стандартной модели кольцевого твердотельного лазера позволяет сделать вывод, что основным физическим механизмом, приводящим к возникновению нестационарных режимов генерации, является модуляция потерь ре-

зонатора при модуляции механических напряжений в активном элементе лазера.

Авторы признательны Е.Г.Ларионову за полезные обсуждения исследуемой проблемы.

Работа поддержана РФФИ (грант № 02-02-16391).

1. Roy R., Thornburg K.S. *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 2009 (1994).
2. Thornburg K.S., Moller M., Roy R. *Phys. Rev. E*, **55**, 3865 (1997).
3. Uchida A., Sato N., Takeoka M., Kannari F. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 912 (1997).
4. Uchida A., Ogawa T., Shinozuka M., Kannari F. *Phys. Rev. E*, **62**, 1960 (2000).
5. De Shazer D., Breban R., Ott E., Roy E. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 044101(4) (2001).
6. Dalglish R., May A.D., Stephan G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 1485 (1998); *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 1493 (1998).
7. Brunel M., Emile O., Alouini M., Le Floch A., Bretenaker F. *Phys. Rev. A*, **59**, 831 (1999).
8. Besnard P., Xiaolin J., Dalglish R., May A.D., Stephan G. *J. Opt. Soc. Am. B*, **10**, 1605 (1993).
9. Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **11**, 1483 (1984).
10. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **22**, 213 (1995).
11. Клименко Д.Н., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 649 (1997).
12. Клименко Д.Н., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **25**, 369 (1998).
13. Кравцов Н.В., Пашинин П.П., Сидоров С.С., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **33**, 321 (2003).
14. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **30**, 105 (2000).
15. Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **23**, 620 (1996).
16. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Ларионцев Е.Г., Макаров А.А. *Квантовая электроника*, **24**, 638 (1997).
17. Полушкин Н.И., Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **10**, 1461 (1983).
18. Золотоверх И.И., Клименко Д.Н., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 938 (1996).
19. Хакен Г. *Лазерная светодинамика* (М.: Мир, 1998).
20. Sanchez F., LeFlohic M., Stephan G.M., LeBoudec P., Francois P.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 481 (1995).
21. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **21**, 903 (1994).