

Подавление хаотических колебаний в твердотельном кольцевом лазере с помощью магнитного поля

Н.В.Кравцов*, П.П.Пашинин**, С.С.Сидоров**, С.Н.Чекина***, В.В.Фирсов*

Исследована возможность подавления хаотических колебаний в двунаправленном кольцевом лазере на $YAG:Nd^{3+}$ с помощью постоянного магнитного поля. Показано, что наложение на активную среду постоянного магнитного поля напряженностью в несколько десятков эрстед переводит лазер из режима синхронного хаоса в импульсный квазипериодический режим генерации.

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

Исследованию особенностей режима динамического хаоса в лазерах в последние годы уделяется большое внимание (см., напр., [1–6]). В частности, широко обсуждается возможность управления стохастическими режимами генерации в лазерах. Эта проблема представляет большой интерес как для фундаментальной науки, так и для практических приложений, поскольку режим динамического хаоса может быть использован при передаче информации.

Проблема управления стохастическими колебаниями в квантовых системах обсуждалась еще в работе [7], где было показано, что хаотические пульсации могут быть подавлены при инжекции внешнего сигнала. Хаотическими колебаниями можно управлять, используя и отрицательную обратную связь [8]. В последние годы широко применяются методы управления хаосом, основанные на использовании внешней периодической модуляции параметров лазера [6, 9, 10].

В настоящей работе изучена возможность управления хаосом в двунаправленном твердотельном кольцевом лазере с помощью внешнего постоянного магнитного поля. Исследования проводились на высокостабильном монолитном кольцевом чип-лазере на $YAG:Nd$ с неплоским резонатором ($\lambda = 1.064$ мкм), периметр которого составлял 2.6 см, а угол неплоскостности – 80° . Накачка лазера осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом мощностью до 0.5 Вт. Конструкция лазера подробно описана в [11].

Режим динамического хаоса в кольцевом чип-лазере достигался с помощью модуляции мощности накачки с частотой $\omega_p/2\pi$, лежащей в пределах 25–40 кГц; глубина модуляции составляла около 25%. В отсутствие модуляции лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода [5]. Частота автомодуляционных колебаний $\omega_{am}/2\pi$ была равна 230 кГц, а частота релаксационных

колебаний при превышении порогового уровня накачки $\eta = 0.25$ составляла 60 кГц.

Внешнее магнитное поле, налагаемое на активный элемент чип-лазера, создавалось электромагнитом. Напряженность магнитного поля в активном элементе в процессе экспериментов могла достигать 500 Э. В отсутствие магнитного поля в лазере при модуляции накачки имел место режим синхронного динамического хаоса [2, 3]. Характерные осциллограммы излучения встречных волн, спектр излучения одной из них и фазовый портрет, полученные при $\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, показаны на рис.1.

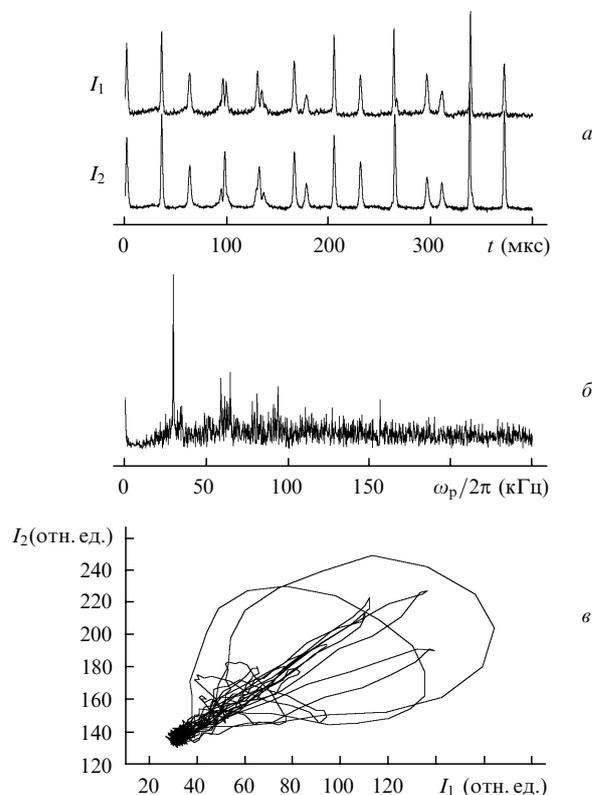


Рис.1. Осциллограммы интенсивностей встречных волн I_1 и I_2 в режиме синфазного синхронного динамического хаоса (а), спектр одной из волн I_1 (б) и фазовый портрет в плоскости I_1 и I_2 (в) в отсутствие магнитного поля ($\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, $\eta = 0.25$).

*НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына при МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

**Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

***Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

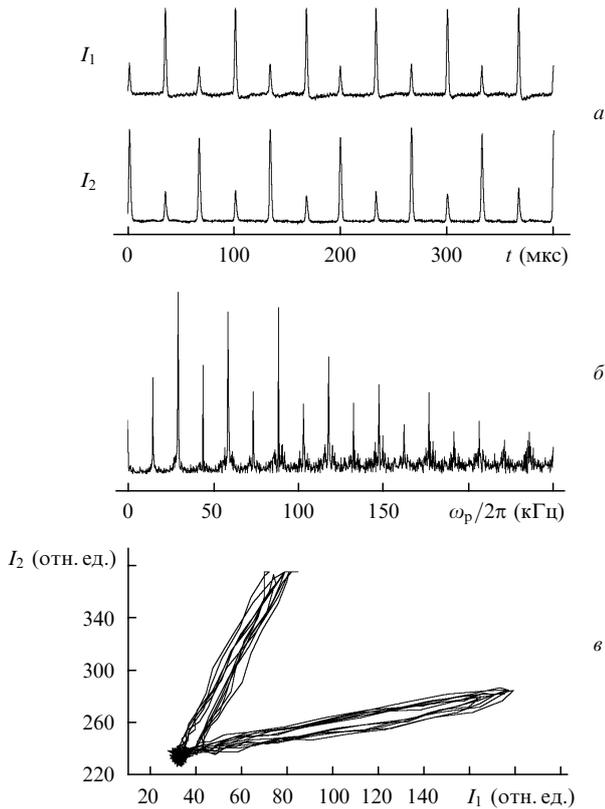


Рис.2. Осциллограммы интенсивностей встречных волн I_1 и I_2 в режиме квазирегулярных пульсаций (а), спектр одной из волн I_1 (б) и фазовый портрет в плоскости I_1 и I_2 (в) при $H = 26$ Э ($\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, $\eta = 0.25$).

Видно, что спектр излучения оказывается достаточно широким и в его составе имеется интенсивная компонента с частотой, соответствующей частоте модуляции накачки.

Было установлено, что наложение магнитного поля, напряженность которого превышает некоторое зависящее от частоты модуляции накачки критическое значение H_{cr} , переводит чип-лазер в режим квазирегулярных пульсаций. На рис.2 приведены характерные осциллограммы встречных волн, спектр излучения одной из волн и фазовый портрет, полученные при $\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц и $H = 26$ Э. Видно, что пульсации излучения становятся регулярными, частота их следования совпадает с частотой модуляции накачки. Амплитуды пиков интенсивности излучения встречных волн оказываются в противофазе. В спектре появляются (в дополнение к частоте 29.5 кГц и ее гармоникам) частоты, кратные 15 кГц. Последние связаны с фурье-спектром огибающей пульсаций излучения. Обращает на себя внимание резкое изменение характера спектра излучения, который становится более «чистым».

Наблюдаемый в эксперименте переход от синхронного хаоса к квазипериодическому режиму имеет место во всей исследуемой области частот модуляции, при этом с увеличением частоты модуляции напряженность магнитного поля, необходимая для осуществления такого перехода, уменьшается: при $\omega_p/2\pi = 26$ кГц критическая напряженность магнитного поля $H_{cr} = 100$ Э, а при $\omega_p/2\pi = 30$ кГц $H_{cr} = 26$ Э. Отметим, что наблюдаемый эффект не зависит от полярности магнитного поля. При существенном превышении магнитным полем значения H_{cr} режим квазипериодических пульсаций сменяется режимом синхронного хаоса (рис.3).

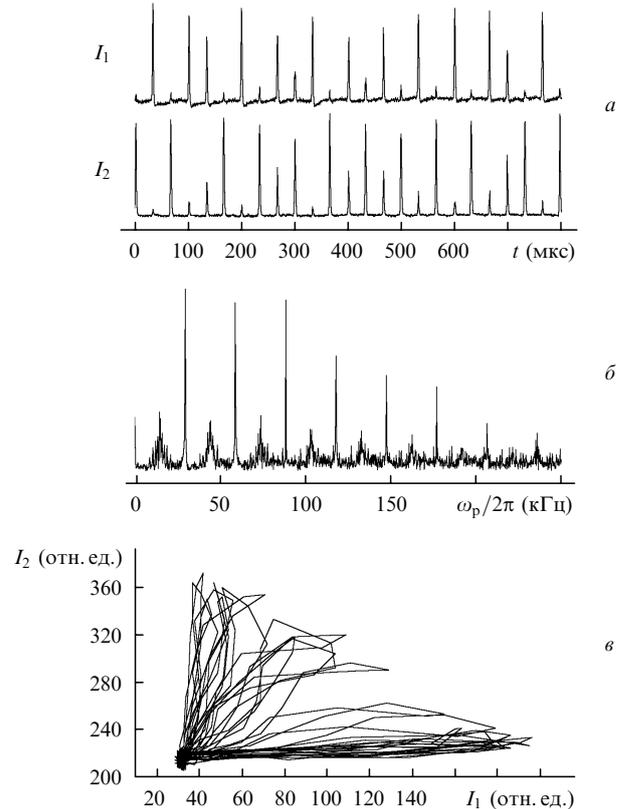


Рис.3. Осциллограммы интенсивностей встречных волн I_1 и I_2 в режиме противофазного синхронного хаоса (а), спектр одной из волн I_1 (б) и фазовый портрет в плоскости I_1 и I_2 (в) при $H = 184$ Э ($\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, $\eta = 0.25$).

Второй характерной особенностью перехода от синхронного хаоса к режиму квазисинхронных пульсаций является наличие гистерезиса (рис.4): для перехода от синхронного хаоса к режиму квазипериодических пульсаций необходимо, чтобы напряженность магнитного поля была примерно на 7 Э больше, чем для обратного перехода (режим квазипериодических пульсаций \rightarrow синхронный хаос).

Возможность перехода от синхронного хаоса к режиму квазипериодических пульсаций была исследована нами еще и методом численного моделирования. Использовалась стандартная модель твердотельного кольцевого лазера, описываемая следующей системой уравнений [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}}{dt} &= -\frac{\omega}{2Q} E_{1,2} \pm i \frac{\Omega}{2} E_{1,2} \\ &+ i \frac{m}{2} E_{2,1} + \frac{\sigma L}{2T} (N_0 E_{1,2} + N_{\pm} E_{2,1}), \\ T_1 \frac{dN_0}{dt} &= N_{th}(1 + \eta) - N_0 [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] \\ &- a(N_+ E_1 E_2^* + N_- E_1^* E_2), \\ T_1 \frac{dN_{\pm}}{dt} &= -N_{\pm} [1 + a(|E_1|^2 + |E_2|^2)] - a N_0 E_1 E_2^*, \\ N_0 &= \frac{1}{L} \int_0^L N dz, \quad N_{\pm} = \frac{1}{L} \int_0^L N \exp(\pm i 2kz) dz, \quad N_- = N_+^*, \end{aligned} \quad (1)$$

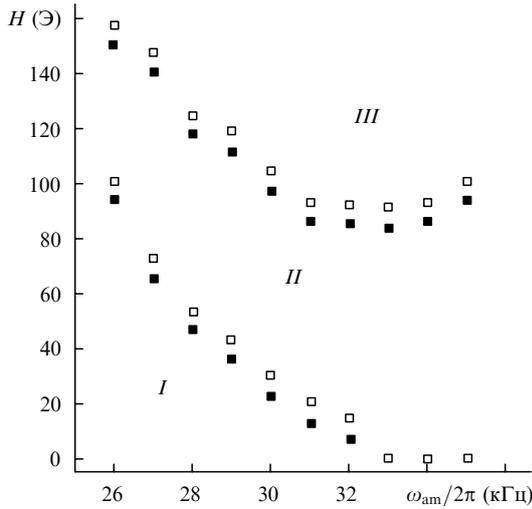


Рис.4. Границы областей существования различных режимов генерации в зависимости от напряженности магнитного поля H и частоты модуляции накачки $\omega_p/2\pi$ при увеличении частоты модуляции (\square) и ее уменьшении (\blacksquare) – режим синфазного синхронного хаоса (I), режим квазипериодических пульсаций (II) и режим противофазного синхронного хаоса (III).

где N_{th} – пороговая инверсная населенность; ω – оптическая частота генерации; Q – добротность резонатора; Ω – частотная невязанность; m – коэффициент связи встречных волн; T_1 – время релаксации инверсной населенности; L – геометрическая длина периметра кольцевого резонатора; $T = nL/c$ – время обхода светом резонатора; n – показатель преломления активной среды; η – превышение мощности накачки над порогом; σ – сечение резонансного перехода; a – параметр насыщения. Превышение мощности накачки над порогом в рассматриваемом случае имеет вид

$$\eta = \eta_0(1 + h \cos \omega_p t), \quad (2)$$

где η_0 – превышение мощности накачки над порогом в отсутствие модуляции; h – глубина модуляции накачки.

Предполагалось, что внешнее магнитное поле приводит к изменению частотной невязанности кольцевого резонатора. Возникающей амплитудной невязанностью мы пренебрегали, поскольку в магнитных полях с напряженностью порядка десятка эрстед возможная амплитудная невязанность мала, в то время как частотная невязанность может достигать десятков кГц.

Расчет проводился в предположении комплексно-сопряженных коэффициентов связи встречных волн. Предполагалось также, что частота генерации ω совпадает с центром линии усиления ω_0 . Проведившиеся 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 от ω_0 обычно мала.

При численном решении уравнений были использованы параметры, близкие по значению к параметрам экспериментально исследуемого лазера ($L = 2.7$ см, $\eta_0 = 0.2$, $\omega_{am0}/2\pi = 230$ кГц), модуляция накачки осуществлялась с частотой $\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц и глубиной $h = 25\%$.

В процессе численного эксперимента было установлено, что при параметрах кольцевого лазера, близких к

параметрам исследуемого чип-лазера в отсутствие магнитного поля или при малых его значениях, имеет место режим синфазного синхронного хаоса. При увеличении напряженности магнитного поля примерно до 40 Э режим синхронного хаоса сменяется квазипериодическим режимом генерации. Однако при дальнейшем увеличении магнитного поля наступает момент, когда режим квазипериодической генерации снова сменяется противофазным синхронным хаосом.

На рис.5 приведены рассчитанные в результате численного моделирования характеристики кольцевого чип-лазера в отсутствие магнитного поля, а на рис.6 – аналогичные характеристики при наложении магнитного поля. Рассчитанные области подавления динамического хаоса в плоскости $\omega_p/2\pi, H$ приведены на рис.7. Для определения этих областей проводился расчет временной зависимости интенсивностей встречных волн и их спектров при различных частотах модуляции накачки (ω_p изменялась от 20 до 38 кГц с шагом 2 кГц), напряженности магнитного поля (H изменялась от 0 до 230 Э с шагом 4 Э) и превышения мощности накачки над порогом.

Сопоставление экспериментальных результатов с результатами численного моделирования свидетельствует о достаточно хорошем их качественном согласии.

Таким образом, в результате проведенных исследований в кольцевом чип-лазере на YAG: Nd обнаружен пороговый эффект подавления стохастических колебаний, сопровождающийся возникновением квазипериодических пульсаций излучения. Обнаруженный эффект открывает дополнительные возможности магнитооптических методов управления нелинейной динамикой твердотельных кольцевых лазеров.

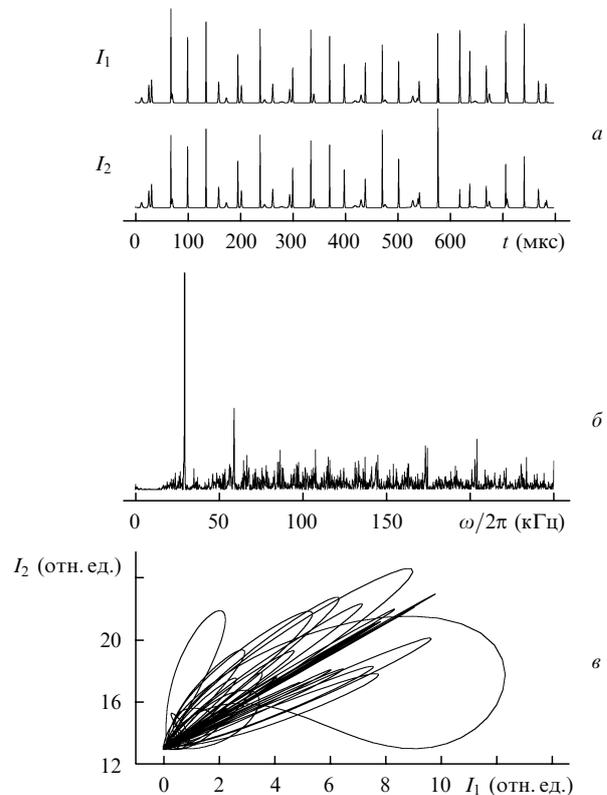


Рис.5. Расчетные характеристики кольцевого чип-лазера: интенсивности встречных волн I_1 и I_2 (а), спектр одной из волн I_1 (б) и фазовый портрет в плоскости I_1 и I_2 в отсутствие магнитного поля (в); $\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, $\eta = 0.25$.

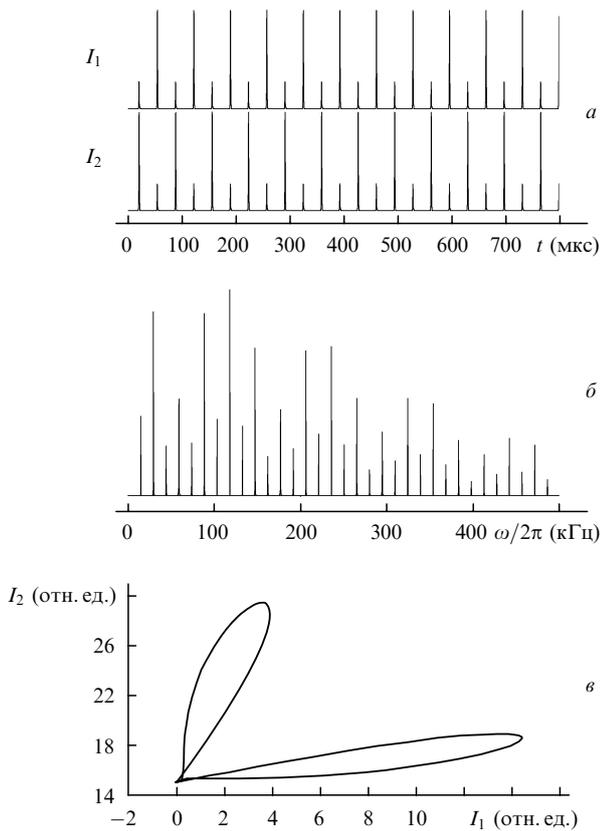


Рис.6. Расчетные характеристики кольцевого чип-лазера: интенсивности встречных волн I_1 и I_2 (а), спектр одной из волн I_1 (б) и фазовый портрет в плоскости I_1 и I_2 при наложении на активную среду магнитного поля напряженностью 40 Э (в); $\omega_p/2\pi = 29.5$ кГц, $\eta = 0.25$.

Авторы выражают признательность Е.Г.Ларионцеву за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-02-16391, 03-02-06090 и 03-02-06091).

1. Uchida A., Sato T., Takeoka M., Kannari F. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 912 (1997).

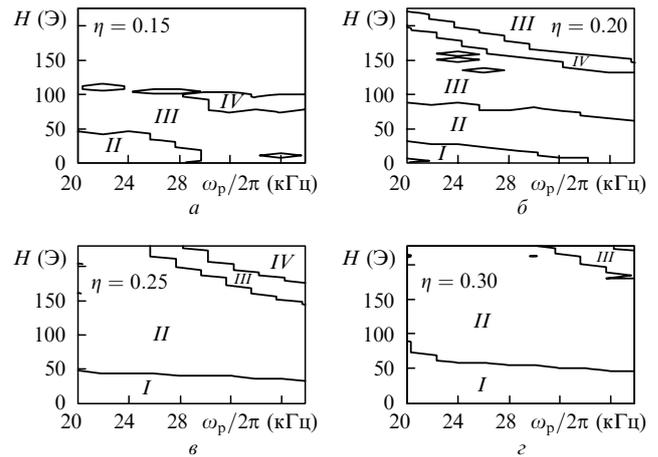


Рис.7. Области существования различных режимов генерации в зависимости от напряженности магнитного поля H , частоты модуляции накачки $\omega_p/2\pi$ и превышения мощности накачки над порогом η , полученные при численном моделировании, – режим синфазного синхронного хаоса (I), режим квазипериодических пульсаций (II), режим противофазного синхронного хаоса (III) и режим, аналогичный режиму II, но с удвоенным периодом следования квазимпульсов (IV).

2. Золотоверх И.И., Клименко Д.Н., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **23** (10), 938 (1996).
 3. Клименко Д.Н., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **24** (7), 649 (1997).
 4. Lima R., Pettini M. *Phys. Rev. A*, **41** (2), 726 (1990).
 5. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Изв. АН. Сер. физич.*, **60** (6), 188 (1994).
 6. Meucci R., Gadomsky W., Ciofini M., Arecchi F.T. *Phys. Rev. E*, **49** (4), 2528 (1994).
 7. Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. *Proc. of the 4-th Intern. Congr. on Microwave Tubes* (Sheveningen, Holland, 1962, p. 446).
 8. Агабекян А.С., Грасюк А.З., Зубарев И.Г. *Радиотехника и электроника*, **9** (12), 2156 (1964).
 9. Roy R., Murphy T.W., Maier T.D., Gills Z. *Phys. Rev. Lett.*, **68** (9), 1259 (1992).
 10. Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 1196 (1990).
 11. Бойко Д.Л., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **24** (7), 653 (1997).
 12. Золотоверх И.И., Клименко Д.Н., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **23** (7), 625 (1996).