

# Квазипериодический режим синхронизации автомодуляционных колебаний кольцевого чип-лазера внешним периодическим сигналом

Т.В.Аулова, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина

*Экспериментально исследована синхронизация периодических автомодуляционных колебаний излучения кольцевого чип-лазера на Nd:YAG при воздействии на него внешнего периодического сигнала, модулирующего мощность накачки. Обнаружен неизвестный ранее квазипериодический режим синхронизации автомодуляционных колебаний. Исследованы характерные особенности поведения спектральной и временной структур синхронизованных квазипериодических колебаний при изменении частоты внешнего сигнала.*

**Ключевые слова:** твердотельный кольцевой лазер, автомодуляционный режим первого рода, квазипериодический режим синхронизации.

## 1. Введение

Синхронизация нелинейных автоколебаний внешним периодическим сигналом является одним из фундаментальных явлений, наблюдающихся в динамических системах разной природы [1]. К настоящему времени хорошо изучена синхронизация периодических и хаотических нелинейных колебаний (см., напр., [1, 2]). При синхронизации периодических колебаний внешним периодическим сигналом общий случай синхронизации порядка  $m/n$  характеризуется следующим соотношением между частотой вынужденных колебаний  $\omega$  и частотой внешнего сигнала  $\Omega$ :  $n\omega = m\Omega$ . В случае квазипериодических нелинейных колебаний синхронизация изучена в значительно меньшей степени, лишь в последнее время были исследованы определяющие ее основные закономерности [3–7]. Большинство работ по синхронизации квазипериодических колебаний внешним сигналом выполнено либо для модельных систем, либо на основе численного моделирования. Несомненный интерес представляет экспериментальное исследование этих явлений в реальных динамических системах, использующихся на практике.

В проводившихся ранее теоретических и экспериментальных исследованиях синхронизация периодических автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом изучалась в монолитных твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) на Nd:YAG [8, 9], в эрбиевых волоконных [10] и в полупроводниковых [11] лазерах. В последнее время в полупроводниковых лазерах изучалась также синхронизация квазипериодических автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом [12].

Как известно, в ТКЛ, помимо стационарных режимов с постоянными интенсивностями встречных волн, могут

возникать также автомодуляционные режимы генерации, среди которых наибольший прикладной интерес представляет автомодуляционный периодический режим первого рода. В автономном ТКЛ этот режим устойчив в широкой области лазерных параметров, за исключением тех областей, в которых частота автомодуляционных колебаний оказывается близкой к удвоенному значению основной релаксационной частоты. В этих областях параметрическое взаимодействие между автомодуляционными и релаксационными частотами приводит к неустойчивости автомодуляционного режима первого рода и к возникновению ряда других автомодуляционных режимов генерации, например режима с удвоенным периодом модуляции [13] и квазипериодического автомодуляционного режима [14].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование квазипериодического режима синхронизации автомодуляционных колебаний, возникающего в ТКЛ с периодической модуляцией мощности накачки.

## 2. Экспериментальная установка

Исследования проводились на моноблочном кольцевом лазере на кристалле Nd:YAG. Геометрический периметр неплоского кольцевого резонатора составлял 28 мм, а угол неплоскостности был равен  $85^\circ$ . Лазер работал на длине волны 1.06 мкм, накачка осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом ( $\lambda_p = 0.810$  мкм). Генератор периодических колебаний, включенный в цепь питания лазерного диода, модулировал мощность накачки.

При наличии модуляции накачки превышение накачки над порогом  $\eta(t)$  представим в следующем виде:

$$\eta(t) = \eta + h \sin(2\pi f_p t), \quad (1)$$

где  $\eta$  – превышение накачки над порогом в отсутствие модуляции;  $h$  и  $f_p$  – глубина и частота модуляции накачки. В процессе экспериментов частота модуляции изменялась в диапазоне 200 – 250 кГц, а глубина модуляции была постоянной и равной 0.2.

Т.В.Аулова, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: e.lariontsev@yahoo.com

Поступила в редакцию 27 января 2011 г., после доработки – 13 апреля 2011 г.

Система термостабилизации позволяла плавно изменять температуру моноблока в пределах  $15\text{--}30^\circ\text{C}$ , что давало возможность плавно изменять отношение модулей коэффициентов обратной связи встречных волн. В рабочих точках температура исследуемого лазера поддерживалась с погрешностью  $0.05^\circ\text{C}$ .

В процессе экспериментов одновременно регистрировались временные и спектральные характеристики интенсивности излучения встречных волн в зависимости от частоты сигнала, модулирующего накачку. Регистрация сигналов проводилась с помощью АЦП 20-12-PCI и широкополосного цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

#### 3.1. Условия возникновения квазипериодического режима автомодуляции

Предшествующие исследования показали [8, 9], что периодическая модуляция накачки в ТКЛ может приводить к синхронизации автомодуляционных колебаний в автомодуляционном режиме первого рода. В этих исследованиях наблюдались лишь периодические режимы синхронизации. В настоящей работе показано, что при определенных условиях, рассмотренных ниже, может возникнуть квазипериодический режим синхронизации автомодуляционных колебаний.

Превышение накачки над порогом  $\eta$  в описываемых экспериментах изменялось  $0.15$  до  $0.2$ . При этих условиях частота автомодуляционных колебаний  $\omega_m$  близка к удвоенной частоте релаксационных колебаний ( $\omega_m \approx 2\omega_r$ ), и в лазере имеет место сильное параметрическое взаимодействие между автомодуляционными и релаксационными колебаниями [13, 14]. При  $\eta \geq 0.22$  возникает бифуркация удвоения периода автомодуляционных колебаний, и автомодуляционный режим первого рода сменяется периодическим автомодуляционным режимом с удвоенным периодом. Как показано в [14], в этой области при определенных условиях могут существовать бистабильные автомодуляционные режимы генерации: автомодуляционный режим первого рода и квазипериодический автомодуляционный режим. На возникновение бистабильности сильное влияние оказывают шумы в лазере, в частности шумовая составляющая мощности накачки. Следует отметить, что бистабильность автомодуляционных колебаний возможна лишь при наличии неравенства модулей коэффициентов обратной связи встречных волн  $m_{1,2}$  [14].

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что изменение температуры моноблока  $T$  приводит к изменению модулей коэффициентов обратной связи встречных волн. Этот вывод следует из того факта, что при изменении  $T$  меняется отношение интенсивностей встречных волн. На рис.1 приведена экспериментально измеренная зависимость отношения средних значений интенсивностей излучения во встречных направлениях  $I_1/I_2$  от температуры. Видно, что при изменении температуры от  $15$  до  $20^\circ$  это отношение практически постоянно и равно двум, а в диапазоне  $20\text{--}25^\circ$  оно близко к единице. По величине  $I_1/I_2$  можно определить отношение модулей коэффициентов обратной связи [15, 16]. В предположении, что разность фаз коэффициентов связи рав-

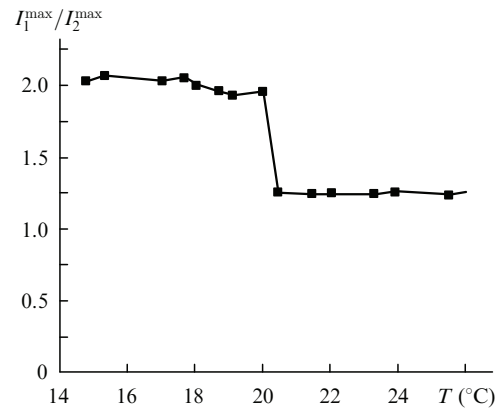


Рис.1. Экспериментально измеренная зависимость отношения средних значений интенсивностей излучения во встречных направлениях  $I_1^{\max}/I_2^{\max}$  от температуры  $T$ .

на нулю и фазовая и амплитудная невзаимности кольцевого резонатора отсутствуют, отношение средних интенсивностей встречных волн определяется следующей формулой:

$$I_1/I_2 = m_1/m_2. \quad (2)$$

Приведенные ниже результаты экспериментальных исследований получены при температуре моноблока  $T = 19^\circ\text{C}$ . При этой температуре, в соответствии с формулой (2), отношение модулей коэффициентов связи близко к двум.

В работе исследовалась синхронизация порядка  $1/1$ .

#### 3.2. Синхронизация автомодуляционных колебаний при периодической модуляции мощности накачки

В отсутствие модуляции накачки внешним сигналом исследуемый лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода. При превышении накачки над порогом  $\eta = 0.2$  частота автомодуляционных колебаний  $\omega_m/2\pi = 220$  кГц, а основная релаксационная частота  $\omega_r/2\pi = 99.5$  кГц. Спектр мощности излучения лазера для одной из встречных волн в этом режиме, показанный на рис.2,а, состоит из одной компоненты на частоте  $\omega_m/2\pi = 220$  кГц. На рис.2,б показана временная зависимость этой волны.

На рис.2,в, г представлены спектры мощности и временные зависимости интенсивности одной из встречных волн в квазипериодическом режиме синхронизации этих автомодуляционных колебаний внешним сигналом с частотой  $f_p = 213.6$  кГц. Как видно из рис.2,в, в спектре мощности присутствуют две независимые компоненты: одна – на частоте автомодуляционных колебаний, захваченной внешним сигналом ( $\omega_m/2\pi = f_p$ ), другая – на частоте  $f_1 = 94.9$  кГц, близкой к основной релаксационной частоте  $\omega_r/2\pi$ . Остальные спектральные компоненты являются комбинационными:  $f_p - f_1$  и  $f_p + f_1$ . Из рис.2,г следует, что в этом режиме синхронизации автомодуляционные колебания имеют низкочастотную огибающую, соответствующую второй основной частоте  $f_1$ . Глубина модуляции на частоте огибающей в этом случае близка к  $100\%$ .

Проведенные исследования показали, что интенсивность второй независимой компоненты (с частотой  $f_1$ ) зависит от частоты внешнего сигнала. На рис.2,д, е приведены спектр мощности и временная зависимость ин-

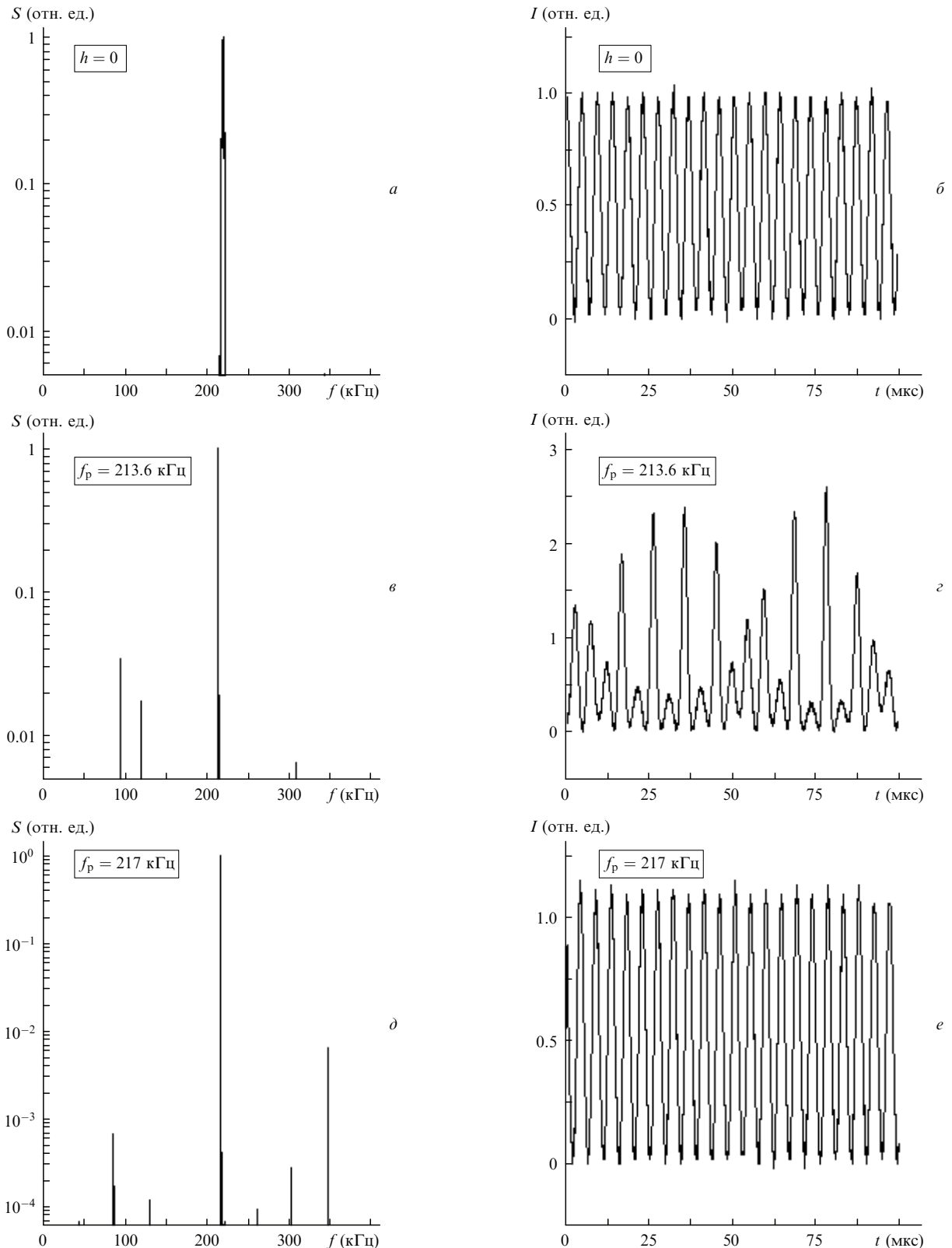


Рис.2. Спектры мощности и временные зависимости интенсивности излучения одной из встречных волн в отсутствие модуляции внешним сигналом ( $h = 0$ ) и при модуляции накачки внешним сигналом с частотами 213.6 и 217 кГц.

тенсивности излучения одной из встречных волн при частоте модулирующего сигнала  $f_p = 217$  кГц. В этом случае интенсивность второй независимой спектральной компоненты в 200 раз меньше, чем основной, поэтому интенсивность синхронизованных автомодуляционных колебаний меняется практически синусоидально.

При обработке полученных спектров мощности была найдена зависимость отношения частот автомодуляции и модуляции  $f_m/f_p$  от частоты модулирующего сигнала, приведенная на рис.3. Видно, что существует область синхронизации частоты автомодуляционных колебаний внешним сигналом, в которой  $f_m/f_p = 1$ . Внутри этой

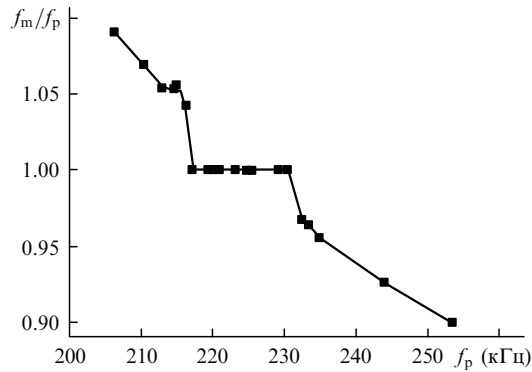


Рис.3. Зависимость отношения частот автомодуляции и модуляции  $f_m/f_p$  от частоты модулирующего сигнала.

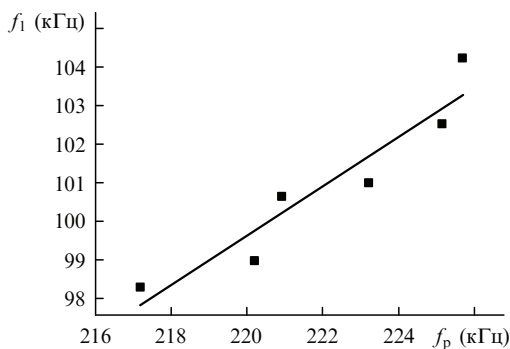


Рис.4. Зависимость частоты второй независимой спектральной компоненты  $f_1$  от частоты модулирующего сигнала  $f_p$ .

области имеет место квазипериодический режим синхронизации с независимыми частотами  $f_p$  и  $f_1$ . Зависимость частоты второй независимой спектральной компоненты  $f_1$  от частоты внешнего сигнала  $f_p$  показана на рис.4; видно, что  $f_1$  слабо зависит от  $f_p$ .

### 3.3. Обсуждение результатов

Если в проводившихся ранее исследованиях синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом наблюдался лишь периодический режим синхронизации [8, 9], то в настоящей экспериментальной работе – квазипериодический. Его возникновение обусловлено двумя факторами. Во-первых, значительным неравенством модулей коэффициентов обратной связи для встречных волн  $m_{1,2}$  (средняя интенсивность одной из волн примерно в два раза превышала интенсивность другой), а во-вторых тем, что исследования проводились вблизи точки бифуркации удвоения периода автомодуляционных колебаний первого рода. В этих условиях, как показано в [14], в ТКЛ, помимо периодического режима первого рода, может существовать и быть устойчивым квазипериодический режим автомодуляционных колебаний. Однако он может наблюдаться лишь при весьма малых флуктуациях интенсивности накачки, обусловленных техническими шумами. При воздействии на лазер внешнего периодического сигнала, модулирующего мощность накачки, устанавливается, по видимому, квазипериодический режим, и в определенной

области частот модулирующего сигнала возникает частичная синхронизация квазипериодических колебаний: частота автомодуляции становится равной частоте внешнего сигнала ( $f_m = f_p$ ), а вторая независимая частота ( $f_1$ ) слабо зависит от частоты внешнего сигнала.

Основные особенности квазипериодического режима синхронизации (наличие двух независимых частот, одна из которых равна частоте внешнего сигнала, а другая не синхронизована с внешним сигналом) характерны для синхронизации нелинейных квазипериодических колебаний внешним сигналом, исследованной в работах [3–7]. В настоящей работе в отсутствие внешнего сигнала имел место периодический режим автомодуляционных колебаний. Такая ситуация, когда при воздействии внешнего сигнала на нелинейные периодические колебания возникают синхронизованные квазипериодические колебания, насколько нам известно, не была изучена ранее, в связи с чем теоретическое исследование этого явления представляет несомненный интерес.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование особенностей процесса синхронизации автомодуляционных колебаний в кольцевом чип-лазере на Nd:YAG внешним периодическим сигналом. Обнаружен неизвестный ранее квазипериодический режим синхронизации автомодуляционных колебаний. Внутри области синхронизации исследовано влияние частоты внешнего сигнала на спектральную и временную структуры квазипериодических колебаний.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-02-00453 и 11-02-00080)

1. Пиковский А., Розенблум М., Куртс Ю. *Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление* (М.: Техносфера, 2003).
2. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е. *Радиотехника и электроника*, **47**, 133 (2002).
3. Анищенко В.С., Николаев С.М. *Нелинейная динамика*, **2**, 267 (2006).
4. Anishchenko V., Nikolaev S., Kurths J. *Phys. Rev. E*, **73**, 056202 (2006).
5. Anishchenko V., Nikolaev S., Kurths J. *Phys. Rev. E*, **76**, 046216 (2007).
6. Anishchenko V., Astakhov S., Vadivasova T. *Eur. Lett.*, **86**, 30003 (2009).
7. Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Тюрюкина Л.В. *Письма в ЖТФ*, **36**, 73 (2010).
8. Золотоверх И.И., Клименко Д.Н., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **23**, 625 (1996).
9. Kravtsov N.V., Lariontsev E.G., Pashinin P.P., Sidorov S.S., Firsov V.V. *Laser Phys.*, **13**, 305 (2003).
10. Pisarchik A.N., Barmenkov Yu.O. *Opt. Commun.*, **254**, 128 (2005).
11. Mendez J.M., Laje R., Giudici M., Aliaga J., Mindlin G.V. *Phys. Rev. E*, **63**, 066218 (2001).
12. Loose A., Wunsche H.-J., Henneberger F. *Phys. Rev. E*, **82**, 035201 (2010).
13. Золотоверх И.И., Камышева А.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **38**, 956 (2008).
14. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **39**, 515 (2009).
15. Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **20**, 67 (1993).
16. Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **23**, 620 (1996).