

На правах рукописи



Дудецкий Вадим Юрьевич

**Параметрические процессы в твердотельном кольцевом лазере с  
несимметричной связью встречных волн**

01.04.05 – оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук, профессор Ларионцев Евгений Григорьевич

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук Хандохин Павел Александрович,  
Институт прикладной физики Российской академии наук, ведущий научный сотрудник (г. Нижний Новгород)

Кандидат физико-математических наук, доцент Савельев Игорь Иванович  
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха», начальник отдела (г. Москва)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики имени А.М. Прохорова» Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится 16 марта 2016 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 (19 корпус НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова, библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова и на сайтах  
<http://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/3bc/4b9/11974971/Diss-Dudetskiy.pdf>  
[http://www.sinp.msu.ru/ru/system/files/dissertations/dissertaciya\\_dudeckiy.pdf](http://www.sinp.msu.ru/ru/system/files/dissertations/dissertaciya_dudeckiy.pdf)

Автореферат разослан 3 февраля 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д501.001.45  
кандидат физико-математических наук

О.М. Вохник

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Твердотельные кольцевые лазеры (ТКЛ) широко используются в научных и прикладных исследованиях. В случае монолитных ТКЛ, накачиваемых полупроводниковыми лазерами, большое практическое значение имеет высокостабильный режим однонаправленной одночастотной генерации. ТКЛ, работающие в этом режиме [1-4], нашли применение в метрологии, спектроскопии высокого разрешения, системах передачи информации, в нелинейно-оптических системах преобразования частоты лазерного излучения, в научных исследованиях (например, по поиску гравитационных волн) и т.д. Важное практическое значение имеет также и другой режим генерации ТКЛ – режим биений. В последнее время этот режим, аналогичный режиму биений в газовых кольцевых лазерах, находит применение в лазерной гироскопии и магнитометрии [5-11].

Актуальной задачей является повышение стабильности автомодуляционных колебаний оптического излучения в монолитных ТКЛ. Ее успешное решение расширяет возможности использования таких лазеров в качестве источников бигармонических колебаний. Синхронизация автомодуляционных колебаний излучения под воздействием высокостабильного периодического сигнала, модулирующего излучение накачки, позволяет значительно улучшить стабильность частоты автомодуляционных колебаний в монолитных ТКЛ [12,13]. Одной из целей исследований по синхронизации колебаний в лазерах является изучение синхронизации как фундаментального явления, наблюдающегося в динамических системах разной природы.

Благодаря высокой стабильности лазерных параметров, монолитные ТКЛ являются удобным объектом для фундаментальных исследований в области нелинейной динамики. ТКЛ – нелинейная оптическая система, для

которой характерна весьма сложная динамика генерации. Изучение нелинейного взаимодействия встречных волн в активной среде является одним из актуальных вопросов. Эти исследования важны для усовершенствования математических моделей, используемых для описания физических процессов в ТКЛ. Исследования динамики излучения ТКЛ дали вклад в изучение процессов синхронизации хаотических колебаний [14-16], а также в изучение нелинейных стохастических процессов, возникающих при воздействии шума на динамическую систему [17,18].

Несмотря на то, что теоретические и экспериментальные исследования динамики ТКЛ ведутся уже почти 50 лет, до настоящего времени ряд особенностей динамики излучения, связанных с параметрическим взаимодействием автомодуляционных и релаксационных колебаний, не был изучен. Сюда относятся вопросы, связанные с возникновением бистабильных автомодуляционных режимов генерации в областях параметрических резонансов, а также с синхронизацией автомодуляционных колебаний в ТКЛ под воздействием периодического сигнала, модулирующего мощность излучения накачки. Бистабильность состояний излучения в ТКЛ представляет интерес в связи с исследованиями по наблюдению стохастического резонанса [19,20].

### **Цель диссертационной работы**

Целями диссертационной работы являются:

1. Исследование синхронизации автомодуляционных колебаний излучения в ТКЛ с несимметричной связью встречных волн под воздействием периодического сигнала, модулирующего мощность излучения накачки;
2. Изучение процессов синхронизации и десинхронизации автомодуляционных колебаний при одновременном воздействии на ТКЛ шумовой и периодической модуляции излучения накачки;

3. Исследование бистабильных состояний, возникающих в ТКЛ в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями.

**Научная новизна исследований**, изложенных в диссертации, состоит в следующем:

1. Обнаружены новые режимы синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом: квазипериодический режим синхронизации и режим синхронизации с удвоенным периодом автомодуляции. Впервые исследована синхронизация автомодуляционных колебаний излучения в ТКЛ с периодической модуляцией мощности накачки в условиях параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями. Найдены области параметров ТКЛ, в которых существуют две ветви бистабильных режимов синхронизации автомодуляционных колебаний.

2. Изучены процессы синхронизации и десинхронизации автомодуляционных колебаний при одновременном воздействии на ТКЛ шумовой и периодической модуляции излучения накачки. Показано, что при малых интенсивностях шумовой модуляции накачки шум способствует синхронизации автомодуляционных колебаний периодическим сигналом.

3. Исследовано влияние несимметричной связи волн и амплитудной невязности резонатора на бистабильность автомодуляционных режимов генерации в автономном ТКЛ. В области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями найдены две ветви бистабильных автомодуляционных режимов генерации, существенно отличающихся по временным и спектральным характеристикам.

## **Практическое значение работы**

1. Результаты проведенных исследований показывают, что нестабильностью автомодуляционных колебаний лазерного излучения, обусловленной оптическими процессами рассеяния света и интерференцией встречных волн, можно эффективно управлять путем модуляции накачки высокостабильным периодическим сигналом. Проведенные в диссертации исследования по синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом позволяют значительно увеличить стабильность частоты автомодуляционных колебаний, что расширяет возможности использования таких лазеров в качестве высокостабильных источников бигармонических колебаний.

2. Бистабильные режимы автомодуляционных колебаний, возникающие в монолитных ТКЛ, представляют интерес для дальнейших исследований по изучению и использованию стохастических процессов в лазерах (в частности, стохастического резонанса).

## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов и выводов определяется их хорошим согласием с экспериментальными исследованиями, проведенными с целью их проверки. Проведенное в диссертации численное моделирование основано на теоретической модели, адекватность которой подтверждена многочисленными исследованиями. Это позволяет считать все полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом в ТКЛ с несимметричной связью встречных волн

внутри области синхронизации возникают как периодические, так и квазипериодические режимы синхронизации. Периодические режимы синхронизации наблюдаются у верхней границы области синхронизации, а квазипериодические – со стороны нижней границы. Ширина области, в которой наблюдается квазипериодический режим синхронизации, возрастает при приближении к границе параметрического резонанса (расширяется с увеличением превышения уровня накачки над порогом  $\eta_0$ ).

2. При синхронизации автомодуляционных колебаний в режиме с удвоенным периодом под воздействием периодической модуляции накачки происходит как захват частоты автомодуляционных колебаний, так и уменьшение вдвое периода автомодуляции.

3. Существует область параметров ТКЛ (превышения накачки над порогом и глубины модуляции накачки), в которой имеет место бистабильность: найдены две ветви бистабильных режимов синхронизации автомодуляционных колебаний.

4. При синхронизации порядка  $1/2$  шум может способствовать вынужденной синхронизации автомодуляционных колебаний периодическим сигналом: в отсутствие шума синхронизация может отсутствовать, а при добавлении достаточно слабого шума она возникает. При последующем увеличении интенсивности шума синхронизация постепенно пропадает.

5. В автономном ТКЛ с несимметричной связью волн при малой амплитудной невзаимности резонатора может существовать бистабильность автомодуляционных колебаний. Найдены две ветви бистабильных состояний, на которых автомодуляционные колебания излучения существенно отличаются по временным и спектральным характеристикам. На первой ветви наблюдаются периодические автомодуляционные режимы: автомодуляционный режим первого рода и режим с удвоенным периодом. Для второй ветви характерна более сложная динамика излучения в зависимости от уровня накачки: с ростом превышения накачки над порогом генерации квазипериодический автомодуляционный режим переходит

в режим динамического хаоса, затем в периодический автомодуляционный режим с удвоенным периодом, и, наконец, в автомодуляционный режим первого рода.

### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертационной работы, базирующиеся на численном моделировании динамики излучения кольцевого лазера, получены самим автором, он принимал также непосредственное участие в обсуждениях экспериментальных исследований, проведенных с целью проверки результатов численного моделирования динамики излучения кольцевого лазера, и в подготовке полученных результатов к публикации.

### **Публикации**

По результатам диссертационной работы опубликовано: 3 статьи в специализированном ведущем научном журнале “Квантовая электроника”, 2 тезиса докладов (электронный ресурс) на международных конференциях и 3 статьи в сборниках научных трудов Международных конференций.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в трех публикациях в специализированном ведущем научном журнале “Квантовая электроника” и докладывались на международных конференциях: IONS-9 Salamanca (Саламанка, 2011), IONS-11 Paris (Париж, 2012), IONS-12 Naples (Неаполь, 2012), Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611577 «Расчет генерации излучения твердотельного кольцевого лазера».

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 106 страниц машинописного текста, включая 19 рисунков. Список цитированной литературы состоит из 90 наименований.

## **Содержание диссертации**

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость, приведены защищаемые положения и кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава диссертации представляет собой краткий литературный обзор, в котором рассмотрена динамика излучения и основные режимы генерации автономного ТКЛ.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию синхронизации автоколебаний в твердотельном кольцевом лазере при модуляции накачки в условиях параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями. Рассмотрена синхронизация автомодуляционных колебаний в ТКЛ при симметричной связи встречных волн, исследованы особенности синхронизации периодических колебаний вблизи границы области параметрического резонанса и в режиме с удвоенным периодом автомодуляции.

Используемая система уравнений, описывающая динамику генерации кольцевых твердотельных лазеров при непрерывной накачке на основе полуклассического подхода в рамках векторной модели, имеет вид:

$$\frac{d\tilde{E}_{1,2}}{dt} = -\frac{\omega}{2Q_{1,2}}\tilde{E}_{1,2} \pm i\frac{\Omega}{2}\tilde{E}_{1,2} + \frac{i}{2}\tilde{m}_{1,2}\tilde{E}_{2,1} + \frac{\alpha}{2T}(1-i\delta)[N_0\tilde{E}_{1,2} + N_{\pm}\tilde{E}_{2,1}]$$

$$T_1 \frac{dN_0}{dt} = N_{th}(1+\eta) - N_0[1 + a(|\tilde{E}_1|^2 + |\tilde{E}_2|^2)] - \tilde{N}_+ a \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2 - \tilde{N}_- a \tilde{E}_1 \tilde{E}_2^*$$

$$T_1 \frac{dN_{\pm}}{dt} = -N_{\pm} - N_{\pm} a (|\tilde{E}_1|^2 + |\tilde{E}_2|^2) - \beta N_0 a \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2$$

$$a = \frac{T_1 c \sigma}{8 \hbar \omega \pi}, \quad \sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \delta^2}.$$

Здесь  $N_0$ ,  $N_{\pm}$  - пространственные гармоники инверсной населенности  $N$ , определяемые выражениями:

$$N_0 = \frac{1}{L} \int_0^L N dz, \quad N_{\pm} = \frac{1}{L} \int_0^L \tilde{e}_1^* \tilde{e}_2 N e^{\pm i 2kz} dz.$$

$N_{th}$  – пороговая инверсная населенность,  $Q_{1,2}$  – добротности резонатора для встречных волн,  $L$  – длина периметра кольцевого резонатора,  $T = L/c$  – время обхода резонатора светом,  $T_1$  – время продольной релаксации,  $\omega/Q_{1,2}$  – ширины полос резонатора,  $l$  – длина активного элемента,  $a$  – параметр насыщения,  $\sigma$  – сечение лазерного перехода.

При периодической модуляции накачки превышение мощности накачки над порогом генерации  $\eta(t)$  имеет вид:

$$\eta(t) = \eta_0 + h \sin(2\pi f_p t),$$

где  $\eta_0$  – превышение мощности накачки над порогом в отсутствие модуляции накачки,  $h$  и  $f_p$  – глубина и частота модуляции накачки.

В ТКЛ с несимметричной связью встречных волн внутри области параметрического резонанса и вблизи от нее исследованы процессы синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом, модулирующим мощность накачки.

Проведены теоретические (на основе численного моделирования) и экспериментальные исследования процессов синхронизации внешним периодическим сигналом, модулирующим мощность накачки, в случае, когда частота модуляции внешнего сигнала  $\omega_p$  близка к частоте автомодуляционных колебаний  $\omega_m$ .

Найдены области значений частоты модуляции мощности накачки  $f_p$ , в которых возникает синхронизация автомодуляционных колебаний, при этом частота автомодуляции захватывается внешним сигналом,  $f_m = f_p$ .

Установлены новые отличительные особенности синхронизации автоколебаний в твердотельном кольцевом лазере при модуляции накачки в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями.

В областях, достаточно близких к границе области параметрического резонанса, возникают два режима синхронизации автомодуляционных колебаний: периодический и квазипериодический режимы синхронизации.

Синхронизация автомодуляционных колебаний возникает в области частот  $f_- \leq f_p \leq f_+$ , где  $f_-$  и  $f_+$  - нижняя и верхняя границы области синхронизации.

В области частот, примыкающей к верхней границе области синхронизации  $f_+$ , существует периодический режим синхронизации, а область существования квазипериодического режима примыкает к нижней границе  $f_-$ .

На рис. 1 показан характерный вид спектров интенсивности излучения для периодического (а) и квазипериодического (б) режимов синхронизации автомодуляционных колебаний. В случае квазипериодического режима синхронизации пик на частоте автомодуляционных колебаний  $f_m$  захвачен частотой модулирующего сигнала  $f_p$ . Кроме того, в спектре излучения в этом случае наблюдаются дополнительные спектральные компоненты на частоте  $f_1$ , близкой к частоте релаксационных колебаний  $f_r$ , а также на комбинационной частоте  $f_p - f_1$ .

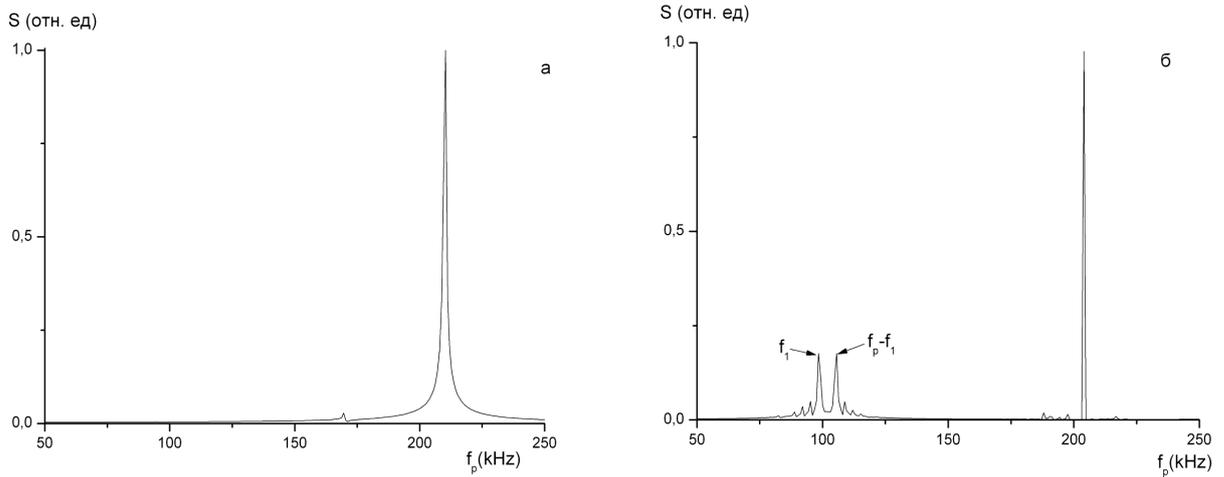


Рис. 1. Спектры интенсивности излучения (численное моделирование) для периодического,  $f_p = 210$  кГц, (а) и квазипериодического,  $f_p = 204$  кГц, (б) режимов синхронизации автомодуляционных колебаний при  $\eta_0 = 0.17, h = 0.25$ .

На рис. 2 показаны области существования периодического и квазипериодического режимов синхронизации при двух значениях превышения накачки над порогом,  $\eta_0 = 0.15$  (а),  $\eta_0 = 0.17$  (б) и глубине модуляции накачки  $h = 0.25$ .

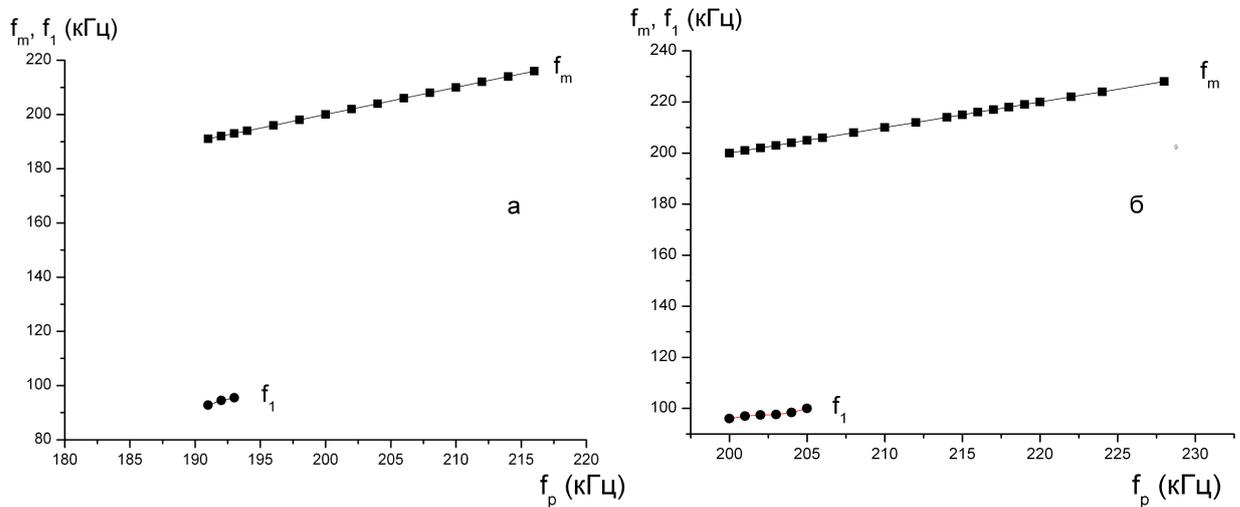


Рис. 2. Найденные при численном моделировании области существования периодического и квазипериодического режимов синхронизации при двух значениях превышения накачки над порогом,  $\eta_0 = 0.15$  (а),  $\eta_0 = 0.17$  (б) и глубине модуляции накачки  $h = 0.25$ .

Ширина области, в которой наблюдается квазипериодический режим, возрастает при приближении к границе параметрического резонанса и расширяется с увеличением  $\eta_0$ .

Внутри области параметрического резонанса впервые исследована синхронизация автомодуляционных колебаний с удвоенным периодом. В этом случае возникает периодический режим синхронизации, в спектре интенсивности которого присутствует лишь спектральная компонента  $f_p$ , а субгармоника  $f_p/2$  отсутствует. Таким образом, в процессе синхронизации в данном случае происходит как захват частоты автомодуляционных колебаний, так и уменьшение вдвое периода автомодуляционных колебаний.

Этот результат подтвержден в эксперименте (см. рис. 3).

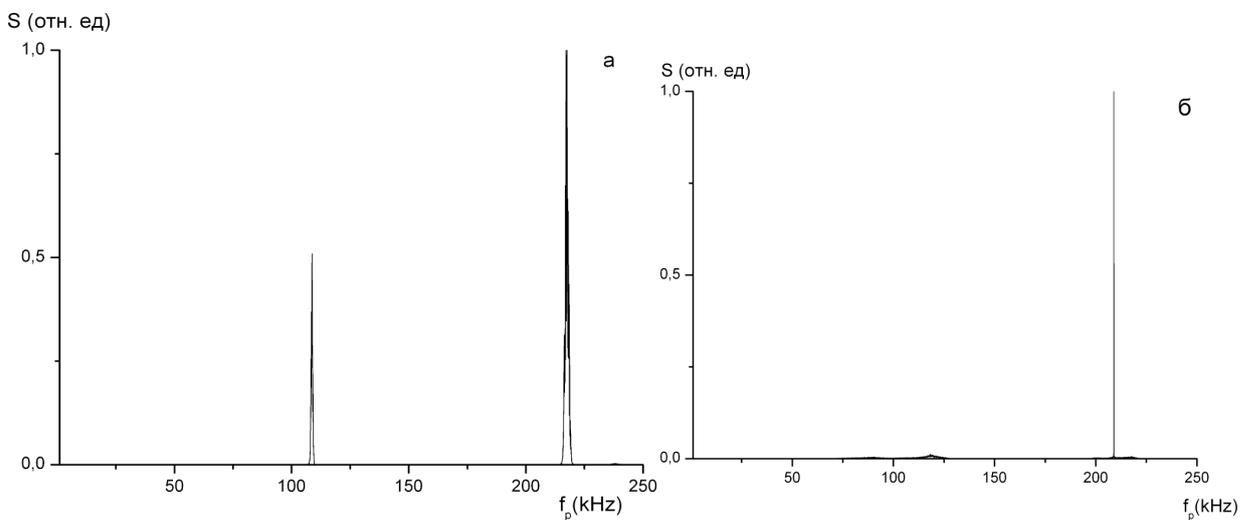


Рис. 3. Экспериментально измеренные при  $\eta_0 = 0.23$  спектры интенсивности излучения: (а) в отсутствие модуляции накачки и (б) в периодическом режиме синхронизации,  $f_p = 209$  кГц,  $h = 0.25$ .

Результаты численного моделирования находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами:

1) периодический режим наблюдается в области частот, примыкающей к верхней границе области синхронизации  $f_+$ , а область существования квазипериодического режима примыкает к нижней границе  $f_-$ ;

2) ширина области существования квазипериодического режима увеличивается с ростом превышения накачки над порогом  $\eta_0$ ;

3) экспериментально измеренные значения частот  $f_1$  дополнительных пиков близки к найденным при численном моделировании.

Экспериментальные исследования показали, что в режиме синхронизации ширина спектральной компоненты, захваченной внешним сигналом ( $f_m = f_p$ ), уменьшается более чем на порядок.

При определенных значениях превышения накачки над порогом и глубине модуляции накачки в областях, достаточно близких к границе области параметрического резонанса, найдены две ветви бистабильных режимов синхронизации автомодуляционных колебаний.

На первой ветви наблюдаются периодический и квазипериодический режимы синхронизации.

На второй ветви при  $0.2 \leq \eta_0 \leq 0.22$ ,  $h = 0.25$  во всей области синхронизации (от нижней границы  $f_- = 184$  кГц до верхней границы  $f_+ = 220$  кГц) наблюдается режим синхронизации с удвоением периода. Таким образом, на второй ветви при синхронизации сохраняется исходное (имевшее место до синхронизации) удвоение периода автомодуляционных колебаний.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований синхронизации и десинхронизации автомодуляционных колебаний в кольцевом чип-лазере под действием периодического сигнала и шума.

Считалось, что шумовая модуляция накачки производится белым шумом и задана случайной функцией  $\xi(t)$  в уравнении для  $N_0$ . Корреляционную функцию шума запишем в виде:

$$\langle \xi(t)\xi(t') \rangle = 2D_p \delta(t - t'),$$

где  $D_p$  – коэффициент диффузии (интенсивность) шума.

Численное моделирование проводилось при параметрах, близких к экспериментально измеренным параметрам кольцевого чип-лазера

на Nd:YAG.

В главе приводятся результаты исследования синхронизации автомодуляционных колебаний при частотах модуляции  $f_p$ , близких к  $2f_m$  (синхронизация порядка 1/2).

В этом случае при малой глубине модуляции накачки  $h$  отсутствует субгармоника  $f_p/2$ , на которой мог бы возникнуть захват частоты автомодуляции внешним сигналом ( $f_m = f_p/2$ ). С увеличением  $h$  может произойти параметрическая раскачка субгармоники  $f_p/2$  и при  $h \geq h_1$ , где  $h_1$  - граница области синхронизации, частота автомодуляционных колебаний захватывается субгармоникой  $f_p/2$ .

После того, как возникла синхронизация, она будет сохраняться и при плавном уменьшении  $h$  вплоть до второй границы области синхронизации  $h_2$ . В области между двумя этими границами ( $h_1 \leq h \leq h_2$ ) имеет место бистабильность.

Если синхронизация еще не возникла, имеет место квазипериодический режим, в котором основными спектральными компонентами являются частота колебаний и частота модуляции накачки.

Если переход в режим синхронизации происходит из квазипериодического режима, то для возникновения синхронизации требуется достаточно большая амплитуда модуляции накачки.

Если же идти в обратном направлении из режима синхронизации и уменьшать глубину модуляции накачки, то синхронизация порядка 1/2 будет наблюдаться при меньших амплитудах (при  $h_2 < h < h_1$ ).

Таким образом, между границами  $h_1$  и  $h_2$  существует область гистерезиса, в которой существует как квазипериодический режим, так и режим синхронизации. Найдена область, в которой наблюдается бистабильность.

Границы области синхронизации порядка 1/2, найденные путем численного моделирования при  $\eta_0 = 0.15$ , показаны на рис. 4.

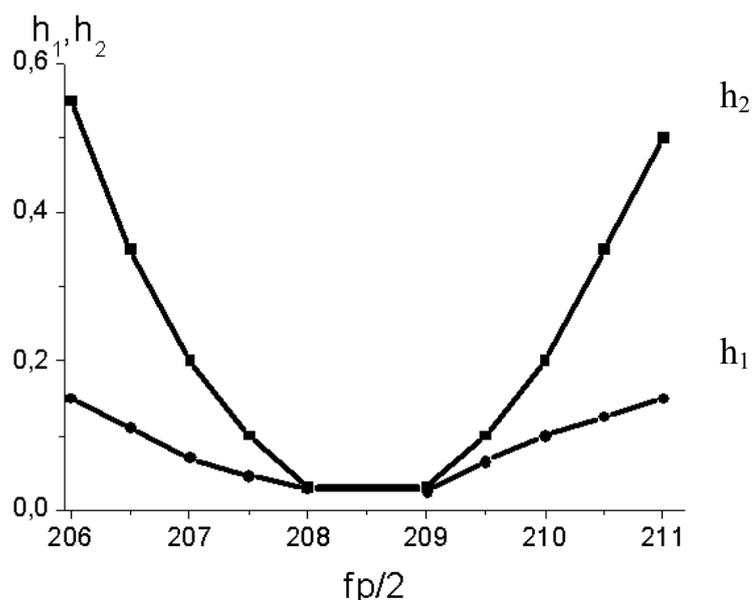


Рис. 4. Границы  $h_1, h_2$  области синхронизации порядка  $1/2$  при воздействии на чип-лазер периодического сигнала модуляции накачки с частотами  $f_p$ , близкими к удвоенной автомодуляционной частоте  $f_m$ .

Результаты численного моделирования показали, что, в отличие от эффекта десинхронизации, обычно возникающего под действием шума при синхронизации автоколебаний (порядка  $1/1$ ) периодическим сигналом, синхронизация порядка  $1/2$  может сопровождаться конструктивным воздействием шума: при достаточно малой интенсивности шум накачки способствует синхронизации автоколебаний, сужению их спектра и увеличению отношения сигнал/шум.

На рис. 5 показана зависимость отношения сигнал/шум ( $S/N$ ) для синхронизации порядка  $1/2$  (при частоте модуляции накачки  $f_p = 412$  кГц) от интенсивности шума  $D$ , найденная при численном моделировании.

Как видно из этого рисунка, при малых интенсивностях шума синхронизация отсутствует ( $S/N=0$ ). Начиная с некоторого порогового значения интенсивности шума ( $D = 0.5$ ), синхронизация порядка  $1/2$  возникает скачком, и частота автомодуляционных колебаний захватывается субгармоникой периодического сигнала модуляции накачки  $f_p/2 = 207$  кГц.

С увеличением интенсивности шума отношение сигнал/шум

изменяется так же, как в случае стохастического резонанса: оно растет при малых интенсивностях и уменьшается при больших.

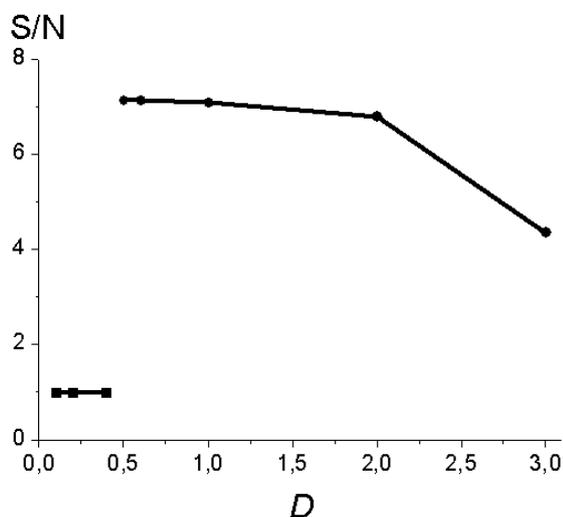


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум при синхронизации порядка  $1/2$  от интенсивности шума  $D$  (частота модуляции накачки  $f_p = 412$  кГц,  $h = 0.3$ ,  $\eta_0 = 0.15$ ).

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили вывод, полученный на основе численного моделирования: при малых интенсивностях шума шумовая модуляция накачки способствует синхронизации автомодуляционных колебаний порядка  $1/2$ .

В четвертой главе в рамках векторной модели ТКЛ с помощью численного моделирования проведен детальный анализ бистабильности автомодуляционных режимов генерации, возникающих в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями.

На основе проведенных исследований найдены области значений превышения накачки над порогом и величины амплитудной невязности, в которых возникает бистабильность автомодуляционных колебаний.

Найдены две ветви бистабильных состояний (рис. 6,7). На первой ветви наблюдаются периодические автомодуляционные режимы: автомодуляционный режим первого рода и режим с удвоенным периодом.

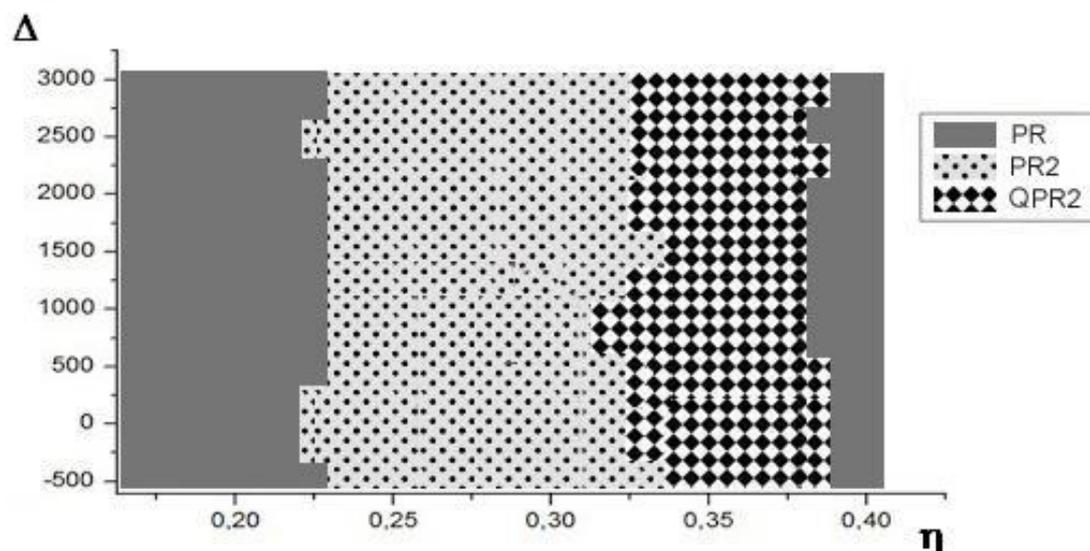
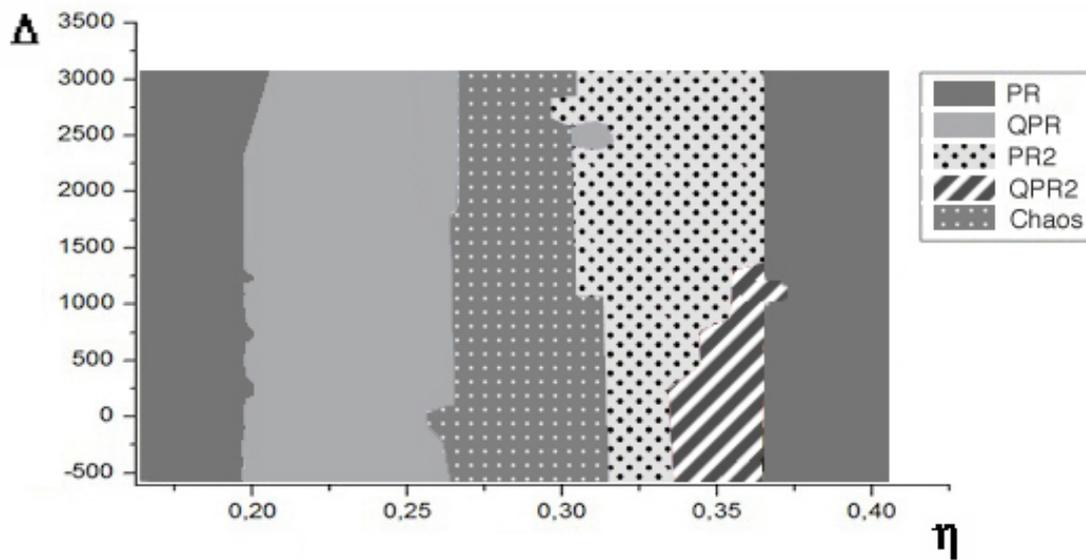


Рис. 6. Области существования автомодуляционных режимов генерации на Ветви 1 в плоскости лазерных параметров  $(\eta, \Delta)$ . PR - периодический автомодуляционный режим первого рода, PR2 - периодический автомодуляционный режим с удвоенным периодом, квазипериодический автомодуляционный режим QPR2.



б

Рис. 7. Области существования автомодуляционных режимов генерации на Ветви 2 в плоскости лазерных параметров  $(\eta, \Delta)$ . QPR - квазипериодический автомодуляционный режим, Chaos - режим динамического хаоса.

Для второй ветви характерна более сложная динамика излучения

в зависимости от уровня накачки: с ростом превышения накачки над порогом генерации квазипериодический автомодуляционный режим переходит в режим динамического хаоса, затем в периодический автомодуляционный режим с удвоенным периодом, и, наконец, в автомодуляционный режим первого рода.

### **Основные результаты и выводы**

1. Установлено, что в ТКЛ с несимметричной связью встречных волн при синхронизации автомодуляционных колебаний периодическим сигналом, модулирующим мощность накачки, кроме известного ранее периодического режима синхронизации возникает также и квазипериодический режим синхронизации. Периодический режим синхронизации наблюдается у верхней границы области синхронизации, а квазипериодический – со стороны нижней границы.
2. Показано, что область, в которой существует квазипериодический режим синхронизации, расширяется при приближении к границе области параметрического резонанса.
3. Установлено, что при синхронизации автомодуляционных колебаний с удвоенным периодом, наблюдаемых в ТКЛ при параметрическом резонансе, возникает периодический режим синхронизации (без удвоения периода автомодуляции).
4. Показано, что в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями при синхронизации автомодуляционных колебаний внешним периодическим сигналом существует бистабильность. Найдены две ветви бистабильных режимов синхронизации. На первой ветви наблюдаются периодический и квазипериодический режимы синхронизации. На второй ветви в области синхронизации

наблюдаются периодический и квазипериодический режимы синхронизации с удвоением периода.

5. Исследованы процессы синхронизации и десинхронизации автомодуляционных колебаний при одновременном воздействии на ТКЛ шумовой и периодической модуляции мощности накачки. Установлено, что при синхронизации порядка  $1/2$  шум способствует вынужденной синхронизации автомодуляционных колебаний периодическим сигналом: в отсутствие внешнего шума синхронизация может отсутствовать, а при добавлении слабого шума происходит стохастическое возбуждение синхронизации.
6. Показано, что в автономном ТКЛ с несимметричной связью встречных волн в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями существует бистабильность автомодуляционных колебаний. На основе численного моделирования найдены две ветви бистабильных состояний. На первой ветви наблюдаются периодические автомодуляционные режимы: автомодуляционный режим первого рода и режим с удвоенным периодом. Для второй ветви характерна более сложная динамика излучения: с ростом превышения накачки над порогом генерации квазипериодический автомодуляционный режим переходит в режим динамического хаоса, затем в периодический автомодуляционный режим с удвоенным периодом, и, наконец, в автомодуляционный режим первого рода.

## Список основных публикаций

1. Дудецкий В.Ю. Бистабильность автомодуляционных колебаний в твердотельных кольцевых чип-лазерах. - Квантовая электроника, 43, 1024 (2013).
2. Дудецкий В.Ю., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Синхронизация автоколебаний в твердотельном кольцевом лазере при модуляции накачки в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями. - Квантовая электроника, 43, 12 (2013).
3. Дудецкий В.Ю., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. Синхронизация и десинхронизация автомодуляционных колебаний в кольцевом чип-лазере под действием периодического сигнала и шума. - Квантовая электроника, 44, 23 (2014).
4. Дудецкий В.Ю. Синхронизация автоколебаний в твердотельном кольцевом лазере при модуляции накачки вблизи и в области параметрического резонанса между автомодуляционными и релаксационными колебаниями. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Инновации в науке», издательский дом «Научное обозрение», Москва, 2015.— С. 91-108.
5. Дудецкий В.Ю. Синхронизация и десинхронизация автомодуляционных колебаний в кольцевом чип-лазере под действием периодического сигнала и шума. Сборник статей по материалам XXXIV международной научно-практической конференции «Естественные и математические науки в современном мире», «СибАК», г. Новосибирск, Россия, 2015. — С. 31-44.
6. Дудецкий В.Ю. Бистабильность автомодуляционных колебаний в автономном твердотельном кольцевом лазере. Сборник статей по материалам XXXIV международной научно-практической конференции «Естественные и математические науки в современном мире», «СибАК», г. Новосибирск, Россия, 2015. — С. 16-27.

7. Международная конференция IONS-9 Salamanca (Саламанка, 2011) "Synchronization of periodic and quasi-periodic oscillations in solid-state ring laser external signals", V.Y. Dudetskiy, Lomonosov, Moscow State Univ. (Russia).

Электронный ресурс:

[http://www.opfocus.net/index.php?id=4&topic=ions9\\_programme](http://www.opfocus.net/index.php?id=4&topic=ions9_programme).

8. Международная конференция IONS-12 (Naples Неаполь, 2012) Vadim Dudetskiy. Influence of the resonator amplitude nonreciprocity on the self-modulations regimes of the generation solid-state ring laser.

Электронный ресурс:

[http://www.opfocus.net/index.php?id=4&topic=ions12\\_programme](http://www.opfocus.net/index.php?id=4&topic=ions12_programme).

#### **Цитируемая литература**

1. T.J. Kane, R.L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser. – Optics Letters, 10, 65-67 (1985).
2. R. Scheps, J. Myers. A single frequency Nd:YAG ring laser pumped by laser diodes. – IEEE J Quantum Electronics. – 26, 413 (1990).
3. H. Zimer, U. Wittrock. 1.6 W of single-mode output power from a novel power-scaling scheme for monolithic non-planar ring lasers. – Opt. Letts.29, 1635 (2004).
4. Bao-Quan Yao, Xiao-Ming Duan, Dan Fang, Yun-Jun Zhang, Liang Ke, You-LunJu, Yue-zhu Wang, and Guang-Jun Zhao. 7.3 W of single-frequency output power at 2.09  $\mu\text{m}$  from an Ho:YAG monolithic non-planar ring laser. – Opt. Letts. 33, 2161 (2008).
5. S. Schwartz, M. Rebut, G. Feugnet, J. Colineau and J.-P. Pocholle. Optimizing the electronic control loop of a solid-state ring laser gyroscope. – arXiv:0709.0798 [physics.optics].
6. S. Schwartz, G. Feugnet, P. Bouyer, E. Lariontsev, A. Aspect, J.-P. Pocholle. Mode-Coupling Controll in Resonant Devices: Application

- to Solid-state Ring Lasers. – Phys. Rev. Lett. 97, 093902 (2006).
7. S. Schwartz, G. Feugnet, E. Lariontsev, and J.-P. Pocholle. Oscillation regimes of a solid-state ring laser with active beat-note stabilization: From a chaotic device to a ring-laser gyroscope. Phys. Rev. A 76, 023807 (2007).
  8. S. Schwartz, G. Feugnet, and J. Pocholle, "Diode-Pumped Solid-State Ring Laser Gyroscope," in Conference on Lasers and Electro-Optics/ Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper JThD47.
  9. S. Schwartz, F. Gutty, G. Feugnet, E. Loil, J.-P. Pocholle. Solid-state ring laser gyro behaving like its helium-neon counterpart at low rotation rates. – Opt. Lett. 34 (no. 24), 3884 (2009).
  10. S. Schwartz, F. Gutty, G. Feugnet, J.-P. Pocholle. "Solid-state ring laser gyro for aerospace applications." International Conference on Space Optics (2012).
  11. Sylvain Schwartz, G. Feugnet, and Jean-Poul Pocholle. Biasing the beat regime of a solid-state ring laser: from a magnetometer to a multioscillator rotation sensor. – J. Opt. Soc. Am. B 30, 2157 (2013).
  12. Кравцов Н.В., Пашинин П.П., Сидоров С.С. Захват частот автомодуляционных колебаний и гистерезис неавтономного двунаправленного кольцевого твердотельного лазера. – Квантовая электроника, 32, 562 (2002).
  13. Kravtsov N.V, Lariontsev E.G., Pashinin P.P., Sidorov S.S., Firsov V.V. Frequency Locking of Self-Modulation Oscillations in a Ring Laser by an External Signal. Laser Phys., 13, 305 (2003).
  14. Д.Н. Клименко, Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов. Синхронизация динамического хаоса во встречных волнах кольцевого лазера. – Квантовая электроника, 24, 649 (1997).
  15. E.G. Lariontsev. Switching of synchronized chaotic oscillations in a modulated solid-state ring laser. – Optics Express, 2, 198 (1998).
  16. L.A. Kotomtseva, N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, S.N. Chekina. Chaotic

synchronization and evolution of optical phase in a bidirectional solid-state ring laser. – Chaos, 13, 279 (2003).

17. И.И. Золотоверх, Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина. Нелинейные стохастические эффекты при воздействии шума на релаксационные колебания в кольцевом твердотельном лазере. – Квантовая электроника, 39, 53 (2009).

18. И.И. Золотоверх, Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев, С.Н. Чекина. Стохастические эффекты при воздействии шума накачки на бистабильные автомодуляционные колебания в твердотельном кольцевом лазере. – Квантовая электроника, 39, 515 (2009).

19. И.И. Золотоверх, Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина. Экспериментальное наблюдение стохастического резонанса в твердотельном кольцевом лазере в отсутствие бистабильности. – Квантовая электроника, 39, 853 (2009).

20. Н.В. Кравцов, Е.Г. Ларионцев, С.Н. Чекина. Стохастический резонанс на субгармонике периодического сигнала модуляции в твердотельном лазере. – Квантовая электроника, 43, 917 (2013).

Подписано в печать: 22.12.2015

Тираж 100 экз. Заказ 121

Отпечатано в отделе оперативной печати

Физического факультета МГУ