

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

PACS 42.55.Rz; 42.60.Da; 42.60.Mi; 42.65.Sf

Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике внешнего модулирующего сигнала в кольцевом YAG:Nd-лазере

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

Экспериментально, а также с помощью численного моделирования исследована динамика генерации твердотельного кольцевого лазера (ТКЛ) с периодической модуляцией накачки при параметрическом возбуждении релаксационных колебаний на субгармонике модулирующего сигнала. Параметрические процессы исследованы при модуляции накачки в двух режимах генерации ТКЛ: стационарном режиме однонаправленной генерации и автомодуляционном режиме первого рода. Обнаружены существенные различия в динамике излучения для этих режимов. Установлено, что при работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода параметрическая неустойчивость может приводить к переходу лазера в режим динамического хаоса.

Ключевые слова: нелинейная динамика, твердотельный кольцевой лазер, автомодуляционный режим генерации первого рода, динамический хаос, бифуркации.

1. Введение

Исследования в области динамики твердотельных кольцевых лазеров (ТКЛ) важны для изучения общих закономерностей нелинейной динамики систем различной природы. К настоящему времени детально изучена теоретически и экспериментально динамика генерации ТКЛ с периодической модуляцией параметров при резонансном возбуждении релаксационных колебаний на частоте внешнего модулирующего сигнала (см., напр., [1, 2] и обзор [3]). Возбуждение релаксационных колебаний можно реализовать как при резонансном воздействии с частотой модулирующего сигнала f_p , близкой к частоте релаксационных колебаний f_r , так и при параметрическом резонансе, когда субгармоника модулирующего сигнала $f_p/2$ близка к частоте релаксационных колебаний f_r . Насколько нам известно, динамика генерации твердотельных лазеров при параметрическом возбуждении релаксационных колебаний ранее не была исследована. Следует ожидать, что бифуркации, возникающие при параметрическом возбуждении релаксационных колебаний, будут зависеть от того, в каком режиме лазер работал в отсутствие модулирующего сигнала.

Целью настоящей работы является исследование динамики генерации, временных и спектральных характеристик излучения твердотельного кольцевого лазера (однонаправленного и двунаправленного) при параметрическом возбуждении релаксационных колебаний субгармоникой модулирующего сигнала.

2. Экспериментальная установка

Исследуемый кольцевой чип-лазер представлял собой моноблок в виде призмы с одной сферической (радиус кривизны 50 мм) гранью и тремя плоскими гранями пол-

ного внутреннего отражения. Геометрический периметр резонатора составлял около 2.8 см. Угол неплоскостности резонатора был равен 80° . Как показали проведенные нами ранее исследования [4], режимами генерации этого лазера можно эффективно управлять с помощью внешнего магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом. В отсутствие внешнего поля исследуемый лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода, а при наличии внешнего поля – в стационарном режиме однонаправленной генерации. Переход из автомодуляционного режима первого рода в режим однонаправленной генерации был вызван тем, что при наложении магнитного поля в кольцевом резонаторе возникала значительная амплитудная невязанность.

Накачка лазера осуществлялась полупроводниковым лазерным диодом на $\lambda = 0.810$ мкм. В цепь питания диода был включен генератор периодических колебаний, который модулировал мощность накачки исследуемого лазера в диапазоне частот 50–220 кГц. Характеристики излучения регистрировались с помощью цифрового осциллографа TektronixTDS 2014.

Исследования проводились при работе ТКЛ (в отсутствие модуляции накачки) в двух режимах генерации: стационарном режиме однонаправленной генерации и автомодуляционном режиме 1-го рода. При модуляции накачки превышение накачки $\eta(t)$ над порогом можно представить в виде

$$\eta(t) = \eta_0 + h \sin(2\pi f_p t), \quad (1)$$

где η_0 – превышение накачки над порогом в отсутствие модуляции накачки; h и f_p – глубина и частота модуляции накачки соответственно.

3. Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний в стационарном режиме однонаправленной генерации

Экспериментальные исследования и численное моделирование динамики ТКЛ в стационарном режиме однонаправленной генерации выполнялись при постоянном

Т.В.Аулова, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобелева МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: e.lariontsev@yahoo.com

Поступила в редакцию 12 мая 2012 г., после доработки – 13 июня 2012 г.

превышении накачки над порогом $\eta_0 = 0.1$. Частота релаксационных колебаний $f_r = 89$ кГц. Частота модуляции f_p изменялась в диапазоне 50–220 кГц, а глубина модуляции h была постоянной и составляла 0.05.

В этом режиме периодическая модуляция накачки с достаточно малой глубиной h приводит в широкой области частот модуляции (за исключением областей параметрического резонанса) к синусоидальной модуляции интенсивности излучения с частотой f_p . Если субгармоника $f_p/2$ модулирующего сигнала приближается к частоте релаксационных колебаний f_r , в ТКЛ возникает параметрическая неустойчивость, приводящая к возбуждению релаксационных колебаний на частоте этой субгармоники. В области параметрической неустойчивости существенно возрастает отклик лазера на сигнал модуляции: модуляция излучения становится импульсной и возникает бифуркация удвоения периода, период следования импульсов T становится равным двум периодам модуляции T_p ($T = 2T_p = 2/f_p$).

Характерные осциллограммы интенсивности излучения в области параметрической неустойчивости приведены на рис.1,а, б при двух значениях частоты сигнала модуляции. На рис.1,в показан полученный в эксперименте спектр интенсивности лазерного излучения. Видно, что в области параметрической неустойчивости возникают спектральные компоненты на частоте $f_p/2$ и кратных ей частотах.

На рис.2 приведены экспериментально измеренные, а также полученные на основе численного моделирования зависимости амплитуды спектральной компоненты $A(f_p/2)$ от частоты модуляции накачки f_p . Как видно из рисунка, существуют две области (I и II), в которых возникает па-



Рис.2. Зависимость амплитуды спектральной компоненты на частоте субгармоники $A(f_p/2)$ от частоты модуляции накачки f_p .

раметрическое возбуждение релаксационных колебаний. При вхождении в область параметрической неустойчивости со стороны больших частот (уменьшение частоты модуляции; область I) параметрическое возбуждение наблюдается при значениях f_p от 190 до 120 кГц. При увеличении частоты модуляции область параметрической неустойчивости оказывается значительно меньше (область II) – от 170 до 190 кГц.

Было проведено также численное моделирование динамики ТКЛ с периодической модуляцией накачки в режиме однонаправленной генерации. Для описания динамики однонаправленной генерации использовалась система скоростных уравнений для интенсивности излучения I и инверсной населенности N

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= -\frac{\omega}{Q}I + \frac{\sigma I}{T}NI, \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{1}{T_1}\{N_{th}[1 + \eta(t)] - N - aIN\}. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь ω/Q – ширина полосы резонатора; $T = L/c$ – время обхода светом резонатора; T_1 – время продольной релаксации, равное для Nd:YAG-лазера 240 мкс; t – длина активного элемента; $a = T_1\sigma I/(8\hbar\omega\pi)$ – параметр насыщения; σ – сечение лазерного перехода. Скорость накачки представлена в виде $N_{th}[1 + \eta(t)]/T_1$, где N_{th} – пороговая инверсная населенность. Как и в случае эксперимента, при численном моделировании динамики ТКЛ значения η_0 и h были постоянными: $\eta_0 = 0.1$, $h = 0.05$. Частота релаксационных колебаний, определяемая формулой

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{(\omega/Q)\eta_0/T_1},$$

при $\eta_0 = 0.1$ задавалась равной экспериментально измеренному значению (89 кГц). При численном моделировании в области параметрической неустойчивости рассчитывался отклик лазера $I(t)$ на сигнал модуляции, а также был найден спектр этого сигнала. На рис.1 представлены экспериментально измеренные зависимости $I(t)$ в сравнении с полученными при численном моделировании, а на рис.2 полученная на основе численного моделирования зависимость амплитуды $A(f_p/2)$ от частоты модуляции накачки f_p сравнивается с экспериментально измеренной. Как видно из этих рисунков, экспериментальные резуль-

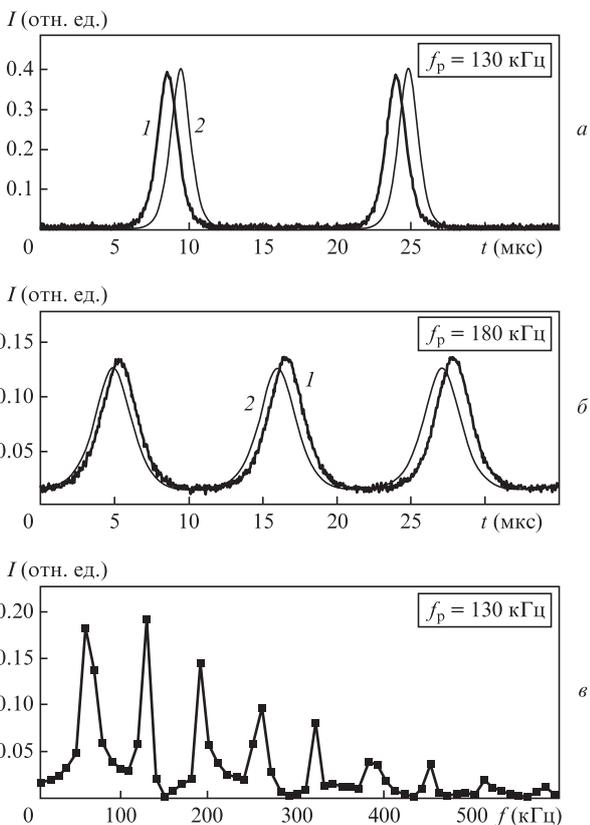


Рис.1. Временные (а, б) и спектральная (в) характеристики излучения в области параметрической неустойчивости при частотах модуляции 130 и 180 кГц (1 – эксперимент, 2 – численное моделирование).

таты хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

4. Параметрическое возбуждение релаксационных колебаний в авто-модуляционном режиме первого рода

В двунаправленном режиме генерации были проведены эксперименты по параметрическому возбуждению релаксационных колебаний на субгармонике $f_p/2$ сигнала модуляции накачки, аналогичные описанным выше в случае однонаправленного режима генерации. Частота модуляции изменялась в диапазоне 50–220 кГц, а глубина модуляции h – от 0.01 до 0.15. Превышение накачки над порогом η_0 изменялось от 0.1 до 1.1.

В отсутствие модуляции накачки лазер работал в авто-модуляционном режиме первого рода, который характеризуется следующими значениями параметров: при $\eta_0 = 0.1$ частота автомодуляционных колебаний $f_m = 209$ кГц, а основная релаксационная частота $f_r = 89$ кГц. Как отмечено в работе [4], в исследуемом монолитном ТКЛ при изменении температуры моноблока можно изменять отношение средних интенсивностей встречных волн I_1/I_2 . В проводившихся в настоящей работе экспериментальных исследованиях температура моноблока была такой, что $I_1/I_2 = 1.2$. Характерные осциллограммы интенсивностей встречных волн и спектр интенсивности одной из волн в этом режиме приведены на рис.3. В спектре интенсивности, показанном на рис.3,б, присутствует лишь одна (основная) спектральная компонента, соответствующая частоте автомодуляционных колебаний f_m . Спектральная компонента на частоте релаксационных колебаний f_r не видна на рис.3,б, т. к. ее интенсивность на три порядка меньше интенсивности основной компоненты.

Модуляция накачки приводит (вне области параметрической раскачки релаксационных колебаний) к воз-

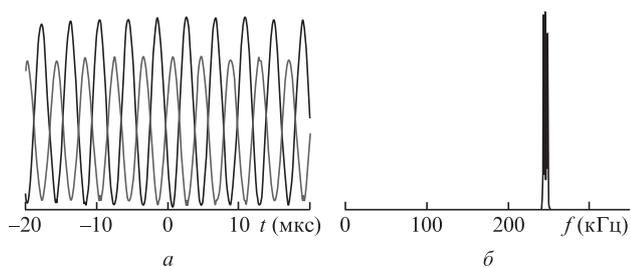


Рис.3. Характерная осциллограмма (а) и спектр интенсивности излучения (б) в автомодуляционном режиме первого рода ($f_m = 255$ кГц, $f_r = 102$ кГц, $\eta_0 = 0.155$).

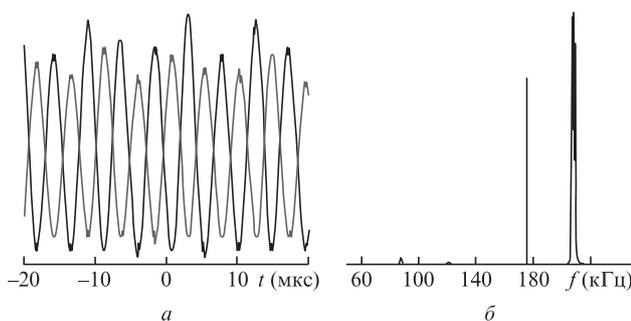


Рис.4. Характерная осциллограмма (а) и спектр интенсивности излучения (б) вне области параметрического резонанса ($f_p = 178$ кГц, $f_m = 210$ кГц, $f_r = 98$ кГц, $\eta_0 = 0.085$).

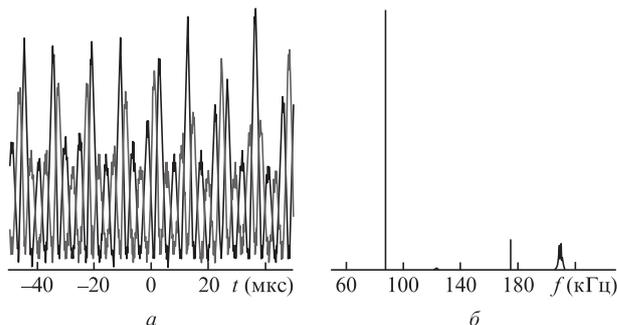


Рис.5. Характерная осциллограмма (а) и спектр интенсивности излучения (б) в области параметрического резонанса для режима квазипериодических колебаний ($f_p = 176$ кГц, $f_m = 210$ кГц, $f_r = 98$ кГц, $\eta_0 = 0.085$).

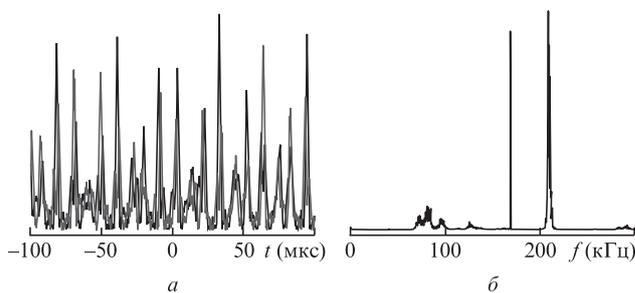


Рис.6. Характерная осциллограмма (а) и спектр интенсивности излучения (б) в области параметрического резонанса для режима динамического хаоса ($f_p = 174$ кГц, $f_m = 210$ кГц, $f_r = 98$ кГц, $\eta_0 = 0.085$).

никновению квазипериодического режима генерации. Характерные осциллограммы и спектр интенсивности излучения в этой области приведены на рис.4. Видно, что при небольшой глубине модуляции ($h = 0.075$) в спектре появляется компонента на частоте модуляции f_p .

Внутри области параметрического резонанса, в отличие от режима однонаправленной генерации, картина становится более сложной. В зависимости от глубины модуляции накачки здесь возможно возникновение как режима квазипериодических колебаний (рис.5), так и режима динамического хаоса (рис.6). Характерные осциллограммы и спектр интенсивности излучения (при воздействии на лазер сигнала модуляции) для квазипериодического режима приведены на рис.5. В этом случае в спектре интенсивности, как и при режиме однонаправленной генерации, возникает дополнительная спектральная компонента на субгармонике $f_p/2$ и спектр остается дискретным. Осциллограммы и спектр интенсивности излучения в режиме динамического хаоса представлены на рис.6. Как видно из рисунка, в этом случае в некоторой окрестности релаксационной частоты f_r спектр становится сплошным.

Границы областей квазипериодического режима и режима динамического хаоса в зависимости от глубины модуляции накачки показаны на рис.7. Видно, что при небольших глубинах модуляции наблюдается лишь квазипериодический режим. В отличие от случая однонаправленной генерации, область существования этого режима оказывается значительно более узкой (несколько кГц) и сужается с увеличением глубины модуляции: при $h = 0.04$ ширина этой области равна 4 кГц, а при $h = 0.08$ – всего 1 кГц. Область существования режима динамического хаоса, напротив, увеличивается с ростом глубины модуляции. В режиме хаоса (при фиксированной глубине модуляции h) область непрерывного спектра существенно изменяет-

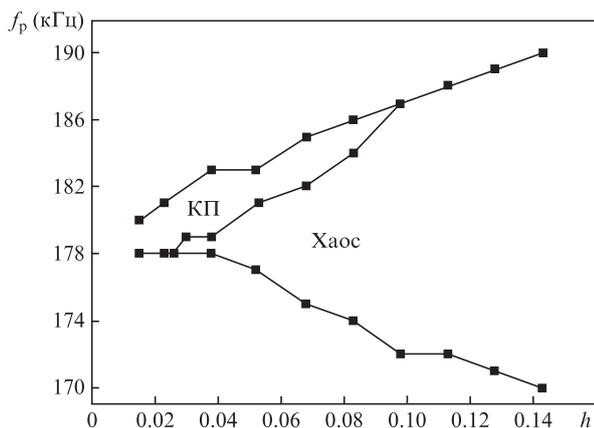


Рис.7. Границы областей квазипериодического режима (КП) и режима динамического хаоса в зависимости от глубины модуляции накачки h .

ся в зависимости от частоты модуляции f_p . На рис.8 показана эволюция непрерывного спектра при изменении f_p . Как следует из рисунка, варьируя частоту модуляции, можно эффективно управлять участком непрерывного спектра в окрестности основной релаксационной частоты.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследовано параметрическое возбуждение релаксационных колебаний на субгармонике сигнала модуляции накачки в ТКЛ. Установлено, что бифуркации, возникающие при параметрическом резонансе, существенно различаются в режимах однонаправленной и двунаправленной генерации. В режиме однонаправленной генерации в области параметрической неустойчивости имеет место бифуркация удвоения периода колебаний. В случае двунаправленной гене-

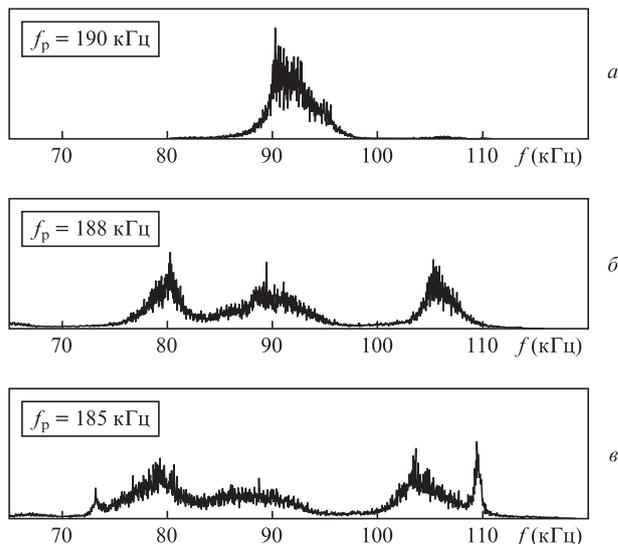


Рис.8. Эволюция участка непрерывного спектра при изменении частоты модуляции f_p и $\eta_0 = 0.015$.

рации в области параметрического резонанса периодический автомодуляционный режим генерации сменяется либо квазипериодическим режимом, либо режимом динамического хаоса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №11-02-00080 и 10-02-00453).

1. Клименко Д.Н., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **25**, 369 (1998).
2. Алешин Д.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 7 (2005).
3. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **34**, 487 (2004).
4. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **41**, 13 (2011).