

# Квазипериодический режим автомодуляционных колебаний с низкочастотной импульсной огибающей в кольцевом чип-лазере

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

*Экспериментально исследована динамика излучения кольцевого чип-лазера на кристалле YAG:Nd при воздействии на него внешним постоянным магнитным полем, создающим оптическую невязанность резонатора. Амплитудная и частотная невязанности кольцевого резонатора, возникающие под действием этого магнитного поля, изменялись при перемещении магнита относительно активного элемента чип-лазера. Обнаружен неизвестный ранее квазипериодический автомодуляционный режим генерации, в котором автомодуляционные колебания интенсивностей встречных волн имеют противофазную низкочастотную огибающую. Исследованы временные и спектральные характеристики излучения, а также найдены условия возникновения этого режима генерации.*

**Ключевые слова:** твердотельный кольцевой лазер, автомодуляционный режим генерации, амплитудная и частотная невязанности кольцевого резонатора.

## 1. Введение

Интерес к исследованиям нелинейной динамики твердотельных кольцевых лазеров обусловлен возможностями их применения как в фундаментальной физике (поиск гравитационных волн, проверка основных положений квантовой электродинамики и теории относительности, фундаментальная квантовая метрология и т.д.), так и в лазерной технике (доплеровские измерительные системы, оптическая связь, лазерная гироскопия и др.). Исследования в области нелинейной динамики кольцевых лазеров вносят также существенный вклад в изучение общих закономерностей поведения нелинейных динамических систем различной природы (в радиотехнике, оптике, биологии, химии, механике и др.).

Твердотельные кольцевые лазеры с однородно уширенной линией усиления являются сложными динамическими системами, в которых вследствие нелинейного взаимодействия встречных волн на наведенной ими решетке инверсной населенности, а также их линейной связи через обратное рассеяние могут возникать разнообразные режимы генерации, различающиеся по временным, спектральным и поляризационным характеристикам излучения. Нелинейная динамика излучения твердотельных кольцевых лазеров исследовалась в большом числе работ (см., например, обзоры [1–4] и цитированную в них литературу). Одними из основных параметров кольцевого лазера, определяющими устойчивость стационарных режимов генерации, являются коэффициенты связи встречных волн через обратное рассеяние  $m_{1,2}$ . При значениях  $m_{1,2}$ , характерных для монолитных кольцевых лазеров (кольцевых чип-лазеров), стационарный режим

однаправленной генерации в нем оказывается неустойчивым. Это приводит к возникновению в чип-лазере автомодуляционного режима первого рода – периодического режима с синусоидальной противофазной модуляцией интенсивностей встречных волн.

Автомодуляционный режим первого рода существует и является устойчивым в широкой области параметров кольцевого чип-лазера, за исключением тех областей параметров, в которых частота автомодуляционных колебаний оказывается близкой к удвоенному значению основной релаксационной частоты. В этих областях вследствие параметрического взаимодействия между автомодуляционными и релаксационными частотами автомодуляционный режим первого рода оказывается неустойчивым, и возникает ряд других автомодуляционных режимов генерации – режим с удвоенным периодом модуляции [5, 6] и квазипериодический автомодуляционный режим [7].

При достаточно слабой связи встречных волн через обратное рассеяние и наличии достаточно сильной фазово-амплитудной связи в твердотельном кольцевом лазере, в принципе, может возникнуть автомодуляционный режим второго рода [8–10], характеризующийся квазипериодическим низкочастотным переключением направления генерации. Однако в кольцевых чип-лазерах этот режим обычно не возникает [4], т. к. у них коэффициенты связи встречных волн через обратное рассеяние оказываются слишком большими (из-за малой длины периметра моноблочного резонатора, составляющей всего несколько сантиметров).

При создании дополнительной обратной связи встречных волн с помощью внешних зеркал в автономном кольцевом чип-лазере были реализованы также и другие автомодуляционные режимы: периодический режим синфазной автомодуляции встречных волн [11] и режим динамического хаоса [5].

Для практических применений монолитных чип-лазеров большой интерес представляет возможность эффек-

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

Поступила в редакцию 16 июня 2010 г.

тивного управления режимами генерации. В кольцевых твердотельных лазерах, состоящих из дискретных элементов, изменение (переключение) режимов генерации обычно осуществляется при использовании управляющих элементов, размещаемых внутри резонатора. С этой точки зрения, недостатком кольцевых чип-лазеров, ограничивающим их практическое применение, является невозможность использования в таких лазерах внутрирезонаторных управляющих элементов.

Выходом из этого положения может быть применение внешнего постоянного магнитного поля, создающего оптическую невзаимность кольцевого резонатора [3, 12–15]. Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования показали, что амплитудная и частотная невзаимности резонатора кольцевого лазера с успехом могут использоваться в качестве управляющих параметров, позволяющих изменять временные и спектральные характеристики выходного излучения таких лазеров. Так, в частности, наложение внешнего магнитного поля на активный элемент кольцевого чип-лазера позволяет осуществить стационарный режим однонаправленной генерации (режим бегущей волны) [14, 15]. Было также показано, что внешнее магнитное поле позволяет создавать частотную подставку при работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода [13]. Отметим, что в проводившихся ранее экспериментальных исследованиях управление динамикой двунаправленной генерации с помощью внешнего магнитного поля осуществлялось в кольцевых чип-лазерах при наличии значительной частотной невзаимности, а амплитудная невзаимность либо вообще отсутствовала, либо была весьма малой [13].

Несомненный интерес представляют исследования возможностей управления динамикой излучения в более общем случае – при произвольном соотношении между частотной и амплитудной невзаимностями. Нами проведены экспериментальные исследования динамики кольцевого чип-лазера на кристалле YAG: Nd при использовании внешнего постоянного магнитного поля, создающего как частотную, так и значительную амплитудную невзаимность.

Цель настоящей работы – исследование временных и спектральных характеристик излучения в обнаруженном новом режиме автомодуляционных колебаний интенсивностей встречных волн с противофазной низкочастотной огибающей.

## 2. Экспериментальная установка

Исследуемый чип-лазер представлял собой моноблок в виде призмы с одной сферической гранью (радиус кривизны 50 мм) и тремя плоскими гранями полного внутреннего отражения. Геометрический периметр резонатора составлял 2.8 см, а угол неплоскостности резонатора –  $80^\circ$ . На верхней поверхности призмы (рис.1,а) располагался магнит, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда размером  $12 \times 8 \times 5$  мм, который был ориентирован (своей длинной стороной) вдоль оси симметрии  $x$  призмы и мог перемещаться с помощью микрометрического юстировочного устройства в этом направлении (рис.1,б). Пространственное распределение создаваемого неоднородного магнитного поля было симметричным относительно плоскости симметрии моноблока. Амплитудная и частотная невзаимности кольцевого ре-

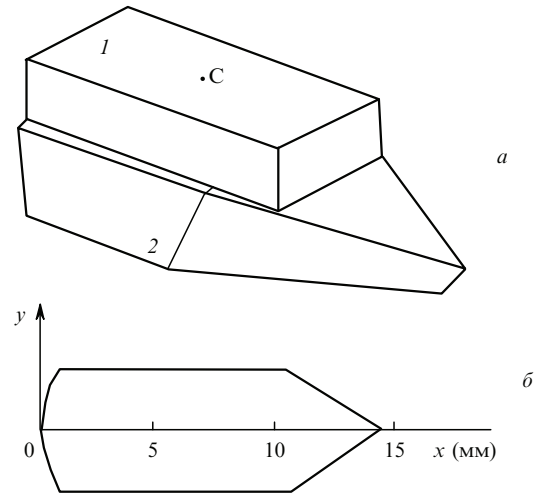


Рис.1. Взаимное расположение магнита (1) и активного элемента (2) чип-лазера (а) и схема, показывающая интервал перемещений ( $0 \leq x \leq 13$  мм) центра магнита (точка С) на оси  $x$  (б).

зонатора, возникающие под действием этого магнитного поля, изменялись при перемещении магнита в достаточно широких пределах.

Следует отметить, что оптическую невзаимность, возникающую при наложении магнитного поля на моноблок чип-лазера, можно точно рассчитать лишь в случае однородного поля. В случае же неоднородного поля это сделать весьма сложно. Величину невзаимности в кольцевом чип-лазере можно измерить при работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода, однако этот режим существует только в ограниченной области положений магнита. Далее в работе мы будем указывать положение центра магнита (точка С) на оси  $x$  (см. рис.1,б). В процессе исследований проводилась одновременная регистрация (с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014) временных и спектральных характеристик интенсивностей излучения встречных волн кольцевого чип-лазера в зависимости от положения магнита.

## 3. Результаты экспериментальных исследований

В отсутствие внешнего магнитного поля исследуемый лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода. Исследования проводились при неизменном превышении накачки над порогом  $\eta = 0.08$ . Частота автомодуляции  $\omega_m/2\pi$  составляла 225 кГц, а основная релаксационная частота  $\omega_r/2\pi$  была равна 89.5 кГц.

Проведенные исследования показали, что при наложении внешнего магнитного поля существуют достаточно широкие области положений центра магнита на оси  $x$ , в которых возникают бифуркации и переходы в другие режимы генерации. В эксперименте центр магнита перемещался в пределах  $0 \leq x \leq 13$  мм. При перемещении центра магнита в интервале  $5 \leq x \leq 13$  мм возникал ряд режимов однонаправленной генерации. Среди этих режимов присутствовал стационарный режим однонаправленной генерации, в котором интенсивность сильной волны постоянна во времени. Кроме него возникали также автомодуляционные режимы с существенно неравными интенсивностями встречных волн. В этих режимах имела место синфазная автомодуляция интенсивностей

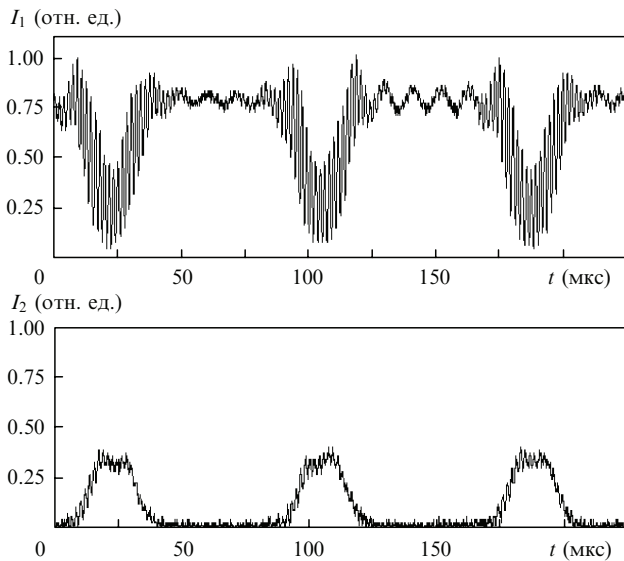


Рис.2. Осциллограммы интенсивностей встречных волн  $I_{1,2}$  в автомодуляционном режиме с противофазной импульсной огибающей.

сильной и слабой волн; результаты их исследования будут опубликованы позднее. Отметим, что сам факт перехода кольцевого чип-лазера из автомодуляционного режима первого рода в режимы с существенно неравными интенсивностями встречных волн свидетельствует о наличии значительной амплитудной невязанности резонатора, возникающей при наложении магнитного поля.

При перемещении центра магнита в область  $3 \leq x \leq 5$  мм режимы синфазной автомодуляции с существенно неравными интенсивностями встречных волн сменяются неизвестным ранее двунаправленным режимом генерации с противофазной импульсной автомодуляцией интенсивностей встречных волн, исследованию которого и посвящена настоящая работа.

Характерные осциллограммы интенсивностей встречных волн в этом режиме приведены на рис.2, из которого видно, что интенсивности встречных волн совершают квазипериодические противофазные колебания сложной формы. В большей части периода  $T$  низкочастотной автомодуляции ( $T \approx 81$  мкс) интенсивность одной из встречных волн ( $I_1$ ) оказывается существенно больше интенсивности другой волны ( $I_2$ ). При этом сильная волна промодулирована с частотой релаксационных колебаний  $\omega_r/2\pi = 89.5$  кГц. В остальной части периода происходит выравнивание интенсивностей встречных волн и возбуждается их противофазная автомодуляция с частотой  $\omega_m/2\pi = 550$  кГц, определяемой связью встречных волн и частотной невязанностью резонатора.

В спектрах интенсивностей встречных волн (рис.3) присутствуют следующие спектральные компоненты: низкочастотные компоненты, кратные частоте следования импульсов огибающей  $f = 1/T = 12.3$  кГц; ряд эквидистантных компонент в окрестности основной релаксационной частоты, отстоящих друг от друга на тот же спектральный интервал (12.3 кГц); несколько эквидистантных компонент вблизи удвоенной релаксационной частоты и, наконец, ряд эквидистантных компонент в окрестности автомодуляционной частоты  $\omega_m/2\pi = 550$  кГц.

Следует отметить, что исследуемый режим существует в относительно узком интервале значений оптичес-

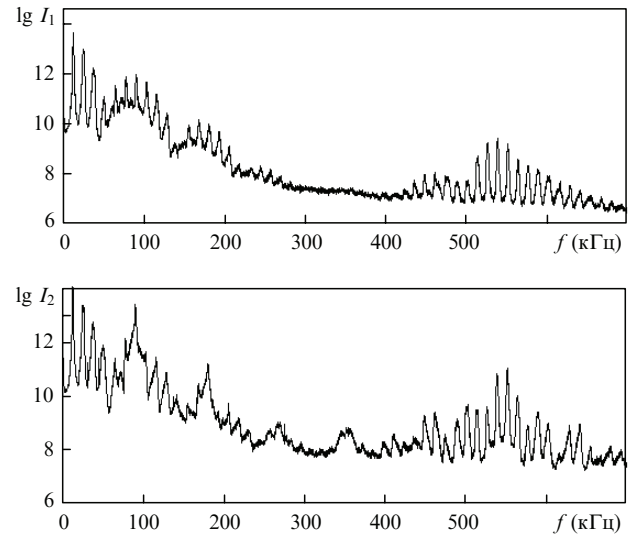


Рис.3. Спектры интенсивностей встречных волн  $I_{1,2}$  в автомодуляционном режиме с противофазной импульсной огибающей.

кой невязанности. Поскольку оптическую невязанность (как амплитудную, так и частотную) в этом режиме не удастся измерить непосредственно, о ширине этой области можно судить лишь качественно по ширине интервала перемещений центра магнита ( $3 \leq x \leq 5$  мм), внутри которого существует исследуемый режим. Кроме того, качественную оценку частотной невязанности можно сделать по изменению автомодуляционной частоты  $\omega_m/2\pi$  (при наложении магнитного поля она изменилась от первоначального значения 225 кГц до 550 кГц).

При перемещении центра магнита в интервале  $3 \leq x \leq 5$  мм режим сохраняется, однако форма автомодуляционных колебаний интенсивности сильной волны изменяется: глубина модуляции интенсивности  $I_1$  на релаксационной частоте возрастает в несколько раз и низкочастотная импульсная модуляция встречных волн становится менее регулярной.

Обнаруженный в настоящей работе автомодуляционный режим имеет ряд особенностей, присущих автомодуляционному режиму второго рода (наличие низкочастотной противофазной импульсной огибающей, а также автомодуляции с частотой релаксационных колебаний). Вместе с тем, есть и существенное различие: в автомодуляционном режиме второго рода изменение интенсивностей встречных волн оказывается практически одинаковым (имеет место лишь задержка на половину периода автомодуляции), а в режиме, исследованном в настоящей работе, наблюдается существенная асимметрия автомодуляции интенсивностей встречных волн, связанная с наличием амплитудной невязанности кольцевого резонатора. При изменении направления магнитного поля на противоположное рассмотренный режим сохраняется, но волны меняются местами.

## Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования нелинейной динамики кольцевого чип-лазера во внешнем постоянном магнитном поле, создающем как частотную, так и значительную амплитудную невязанность, позволили обнаружить новый квазипериодический автомодуляционный режим двунаправленной

генерации, характеризующийся наличием противофазной низкочастотной огибающей автомодуляционных колебаний встречных волн. Этот режим имеет ряд особенностей, присущих автомодуляционному режиму второго рода, однако отличается от него существенной асимметрией автомодуляции интенсивностей встречных волн, связанной с наличием амплитудной невязимности кольцевого резонатора.

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

1. Kravtsov N.V., Lariontsev E.G., Shelaev A.N. *Laser Phys.*, **3**, 21 (1993).
2. Кравцов Н.В. Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **21**, 903 (1994).
3. Кравцов Н.В. Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **30**, 105 (2000).
4. Кравцов Н.В. Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 192 (2006).
5. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Ларионцев Е.Г., Макаров А.А. *Квантовая электроника*, **24**, 638 (1997).
6. Золотоверх И.И., Камышева А.А., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **38**, 956 (2008).
7. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **39**, 515 (2009).
8. Клочан Е.Л., Корниенко Л.С., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Шелаев А.Н. *ЖЭТФ*, **65**, 1344 (1973).
9. Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **15**, 1993 (1988).
10. Khanin Ya.I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **5**, 889 (1988).
11. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Макаров А.А., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 195 (1996).
12. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. *Квантовая электроника*, **27**, 98 (1999).
13. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Наумкин Н.И., Сидоров С.С., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 649 (2001).
14. Arie A., Schiller S., Gustafson E.K., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **17**, 1205 (1992).
15. Trutna W.R., Donald D.K., Nazarathy M. *Opt. Lett.*, **12**, 248 (1987).