

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

Управление режимами генерации кольцевого чип-лазера при воздействии постоянным магнитным полем

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

Рассмотрена реализация различных режимов генерации в автономном кольцевом чип-лазере, представляющая достаточно сложную проблему. Предложен и продемонстрирован простой и эффективный способ управления динамикой излучения кольцевого чип-лазера на YAG: Nd при воздействии на него внешним постоянным магнитным полем, создающим как частотную, так и значительную амплитудную невязанность. Амплитудная и частотная невязанности кольцевого резонатора, возникающие под действием этого магнитного поля, изменялись при перемещении магнитного элемента чип-лазера. Экспериментально реализован ряд автомодуляционных и стационарных режимов генерации, режим биений и режим динамического хаоса. Исследованы временные и спектральные характеристики излучения, а также найдены условия возникновения режимов генерации.

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

1. Введение

Твердотельные кольцевые лазеры (ТКЛ) с однородно уширенной линией усиления являются сложными динамическими системами, в которых могут возникать разнообразные режимы генерации, различающиеся по временным, спектральным и поляризационным характеристикам излучения. Нелинейная динамика излучения ТКЛ исследовалась в большом числе работ (см., напр., обзоры [1–5] и цитированную в них литературу). Проведенные исследования показали, что в случае неавтономных ТКЛ [4] (в частности, ТКЛ с периодической модуляцией параметров) многообразие наблюдаемых режимов генерации оказывается существенно более широким, чем в случае автономных ТКЛ [2, 3, 5].

Большой научный и практический интерес имеют монолитные (монокристалльные) ТКЛ (кольцевые чип-лазеры). Отличительными характеристиками монолитных лазеров является высокая временная, частотная и поляризационная стабильность излучения, малая чувствительность к внешним помехам и высокая эффективность. Для практических применений монолитных чип-лазеров большой интерес представляет возможность эффективного управления режимами генерации. В ТКЛ, 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 них внутрирезонаторных управляющих элементов.

Т.В.Аулова, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, С.Н.Чекина, В.В.Фирсов. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы, 1; e-mail: e.lariontsev@yahoo.com

Выходом в этой ситуации может быть использование внешнего постоянного магнитного поля, создающего оптическую невязанность кольцевого резонатора [3, 6–9]. Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования показали, что амплитудная и частотная невязанности резонатора кольцевого лазера с успехом могут использоваться в качестве управляющих параметров, которые позволяют изменять временные и спектральные характеристики выходного излучения таких лазеров. Так, в частности, наложение внешнего магнитного поля на активный элемент кольцевого чип-лазера позволяет реализовать режим однонаправленной генерации (режим бегущей волны) [8, 9]. Было также показано, что внешнее магнитное поле позволяет создавать частотную подставку при работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода [7]. Отметим, что в проводившихся ранее экспериментальных исследованиях управление динамикой двунаправленной генерации с помощью внешнего магнитного поля осуществлялось в кольцевых чип-лазерах при наличии произвольной частотной невязанности, а амплитудная невязанность либо вообще отсутствовала, либо была весьма малой [7].

Несомненный интерес представляют исследования возможностей управления динамикой излучения в более общем случае: при произвольном соотношении между частотной и амплитудной невязанностями. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования динамики кольцевого чип-лазера на YAG: Nd при использовании внешнего постоянного магнитного поля, создающего как частотную, так и значительную амплитудную невязанность. Эти исследования показали, что при воздействии на кольцевой чип-лазер внешним постоянным магнитным полем можно эффективно управлять режимами генерации ТКЛ.

2. Экспериментальная установка

Исследуемый чип-лазер представлял собой монокристалл в виде призмы с одной сферической (радиус кривизны

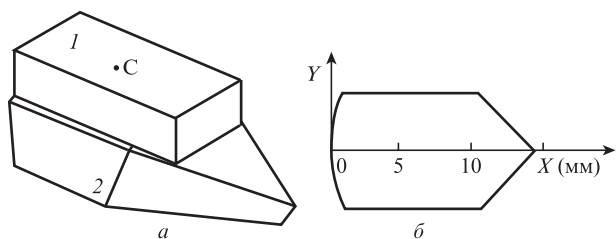


Рис.1. Взаимное расположение магнита 1 и активного элемента 2 чип-лазера (а) и принципиальная схема, поясняющая положение центра магнита (точка С) на оси X и интервал его перемещений (б).

50 мм) гранью и тремя плоскими гранями полного внутреннего отражения. Геометрический периметр резонатора составлял 2.8 см, угол неплоскости резонатора – 80° . На верхней поверхности призмы (рис.1,а) располагался магнит, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда (бруска) размером $12 \times 8 \times 5$ мм, который был ориентирован (своей длинной стороной) вдоль оси симметрии X призмы. В ходе эксперимента центр этого бруска (точка С) перемещался вдоль оси X (с помощью микрометрического юстировочного устройства) в пределах $0 \leq X_C \leq 13$ мм (рис.1,б).

Пространственное распределение неоднородного магнитного поля, создаваемого с помощью магнита, было симметричным относительно плоскости симметрии моноблока. Амплитудная и частотная невязимости кольцевого резонатора, возникающие под действием этого магнитного поля, изменялись при перемещении магнита в достаточно широких пределах.

Следует отметить, что оптическую невязимость, 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 невязимости в кольцевом чип-лазере можно измерить при работе лазера в автомодуляционном режиме первого рода, однако этот режим существует только в ограниченной области положений магнита. В связи с этим далее в работе мы будем указывать положение центра магнита на оси X (рис.1,б).

В процессе исследований проводилась одновременная регистрация временных и спектральных характеристик интенсивностей излучения встречных волн кольцевого чип-лазера в зависимости от положения магнита. Характеристики излучения регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014.

3. Результаты экспериментальных исследований

В отсутствие внешнего магнитного поля исследуемый лазер работал в автомодуляционном режиме первого рода. Исследования проводились при постоянном превышении накачки над порогом $\eta = 0.08$. Частота автомодуляции в этом случае $f_m = 225$ кГц, а основная релаксационная частота $f_r = 89.5$ кГц. Характерные осциллограммы интенсивностей встречных волн приведены на рис.2,а. Видно, что средние интенсивности встречных волн I_1, I_2 оказываются неравными. Как было отмечено в работе [10], в исследуемом чип-лазере при изменении температуры моноблока можно изменять отношение средних интенсивностей встречных волн I_2/I_1 . В проводившихся в настоящей работе экспериментальных исследованиях была выбрана температура моноблока, при которой $I_2/I_1 = 1.2$.

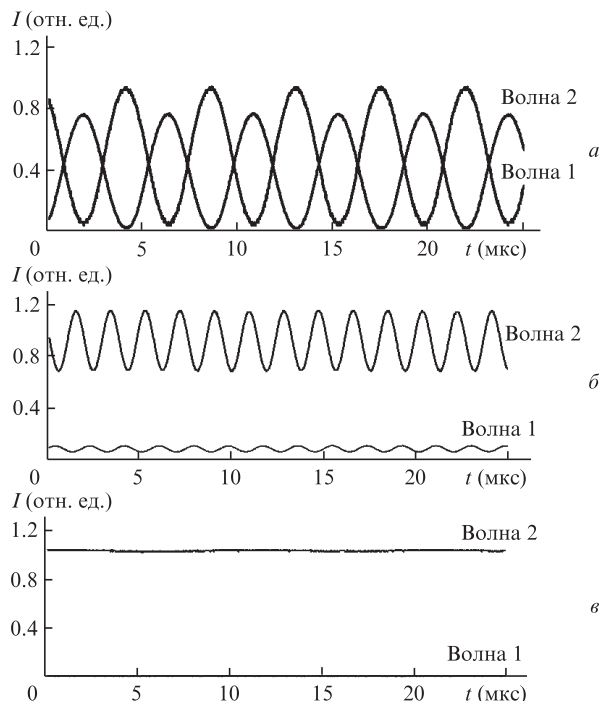


Рис.2. Осциллограммы интенсивностей встречных волн 1 и 2 в автомодуляционном режиме первого рода в отсутствие внешнего магнитного поля (а) и при положении центра магнита в точке $X_C = 13$ мм (б), а также осциллограмма интенсивностей встречных волн в стационарном режиме однонаправленной генерации при положении центра магнита в точке $X_C = 7.5$ мм (в).

При приближении магнита к лазерному моноблоку автомодуляционный режим первого рода сохранялся при положениях центра магнита в области $7.5 \text{ мм} \leq X_C \leq 13 \text{ мм}$. В этой области характеристики автомодуляционных колебаний зависели от положения магнита. Частотная и амплитудная невязимости, возникающие в чип-лазере под действием магнитного поля, приводили к увеличению частоты автомодуляционных колебаний f_m . С ростом f_m наблюдалось постепенное подавление одной из волн, изначально являвшейся более слабой (волна 2), а интенсивность встречной волны (волна 1) возрастала. При этом глубина модуляции интенсивностей существенно уменьшалась. На рис.2,б приведены осциллограммы интенсивностей встречных волн при положении центра магнита в точке $X_C = 13$ мм. В этом случае частота $f_m = 550$ кГц.

Проведенные исследования показали, что существуют определенные области положений центра магнита X_C , в которых возникают бифуркации, и чип-лазер генерирует в других режимах. Кроме автомодуляционного режима первого рода, возникали также автомодуляционные режимы с существенно неравными интенсивностями встречных волн.

3.1. Режимы однонаправленной генерации

При уменьшении глубины автомодуляции интенсивностей встречных волн до нуля ($X_C = 7.5$ мм) автомодуляционный режим перестает существовать и возникает стационарный режим однонаправленной генерации (см. рис.2,в). Отношение средних значений интенсивностей I_1/I_2 в этом случае оказывается равным 0.02 и продолжает уменьшаться при перемещении магнита. При положении центра магнита в области $X_C < 6.5$ мм стационарный

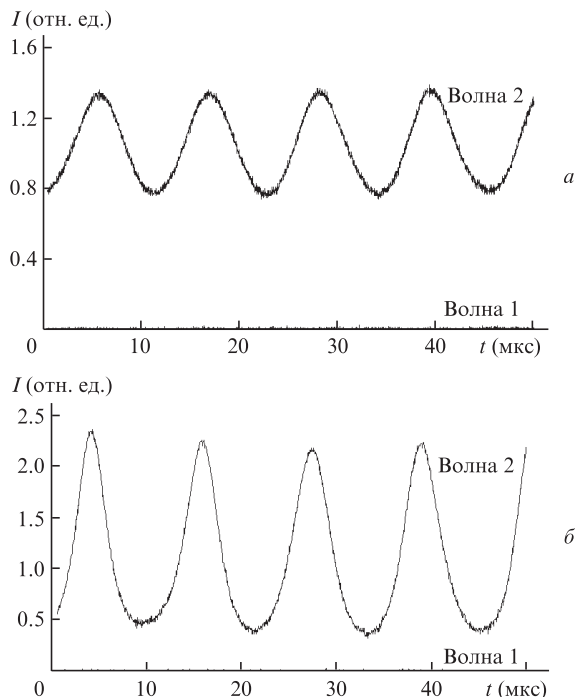


Рис.3. Осциллограммы интенсивностей встречных волн 1 и 2 в периодическом автомодуляционном режиме однонаправленной генерации при положении центра магнита в точке $X_C = 6.45$ (а) и 6.53 мм (б).

однонаправленный режим становится неустойчивым. Неустойчивость приводит к самовозбуждению релаксационных колебаний интенсивности излучения, в результате наблюдался ранее экспериментально не исследованный режим однонаправленной генерации с автомодуляционными колебаниями на релаксационной частоте. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в автомодуляционном режиме однонаправленной генерации показаны на рис.3. Автоколебания с малой глубиной модуляции оказываются синусоидальными с частотой $f_r = 89.5$ кГц. При дальнейшем перемещении магнита вдоль оси X глубина модуляции на релаксационной частоте увеличивается почти до 100% (рис.3,б).

3.2. Режим динамического хаоса

Проведенные в настоящей работе исследования продемонстрировали возникновение режима динамического хаоса в автономном ТКЛ. Ранее режим хаоса в автономном ТКЛ удавалось наблюдать лишь при создании дополнительной обратной связи встречных волн с помощью внешних зеркал [11]. Режим динамического хаоса в исследуемом лазере возникает при переходе из автомодуляционного режима однонаправленной генерации в области $5.4 \text{ мм} < X_C < 6.5 \text{ мм}$. На рис.4 при $X_C = 6$ мм приведены характерные осциллограммы интенсивностей встречных волн в режиме динамического хаоса. Видно, что средние значения интенсивностей существенно различаются (средняя интенсивность волны 1 существенно меньше средней интенсивности волны 2). Таким образом, генерация в режиме хаоса близка к однонаправленной. На рис.5 приведен спектр интенсивности сильной волны 2 в этом режиме. Как видно из рисунка, в спектре сильной волны имеется характерная для динамического хаоса область с непрерывным частотным спектром.

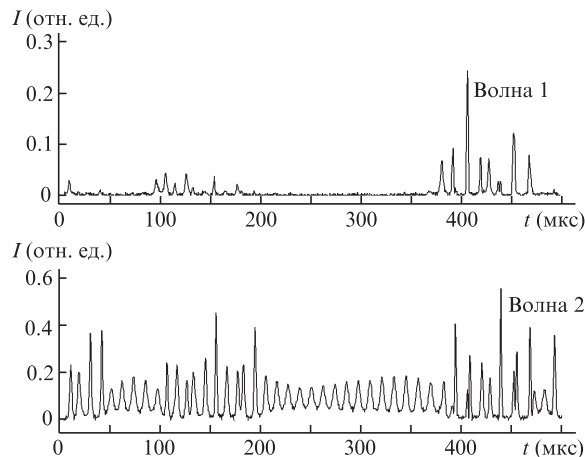


Рис.4. Осциллограммы интенсивностей встречных волн 1 и 2 в режиме динамического хаоса. Центр магнита в точке $X_C = 6$ мм.

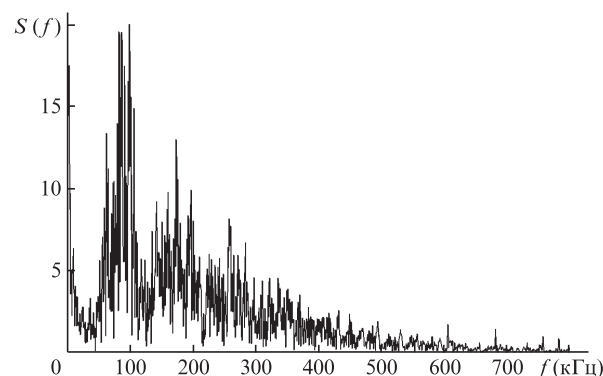


Рис.5. Спектр интенсивности $S(f)$ сильной волны 2 в режиме динамического хаоса. Центр магнита в точке $X_C = 6$ мм.

3.3. Синфазный автомодуляционный режим генерации

В области $5 \text{ мм} < X_C < 5.5 \text{ мм}$ режим динамического хаоса сменяется синфазным автомодуляционным режимом генерации. В этом режиме, наблюдавшемся впервые экспериментально в работе [12], в отличие от автомодуляционного режима первого рода, вместо противофазной модуляции имеет место синфазная модуляция интенсивностей встречных волн. На рис.6 при $X_C = 5.5$ мм приведены осциллограммы интенсивностей встречных волн, на которых видна синфазная импульсная модуляция интенсивностей встречных волн на релаксационной частоте.

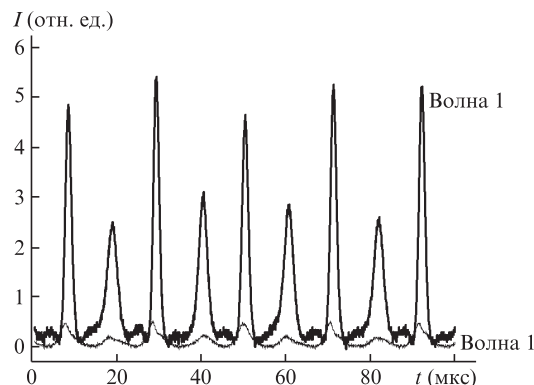


Рис.6. Осциллограммы интенсивностей встречных волн 1 и 2 в режиме синфазной автомодуляции интенсивностей встречных волн при положении центра магнита в точке $X_C = 5.5$ мм.

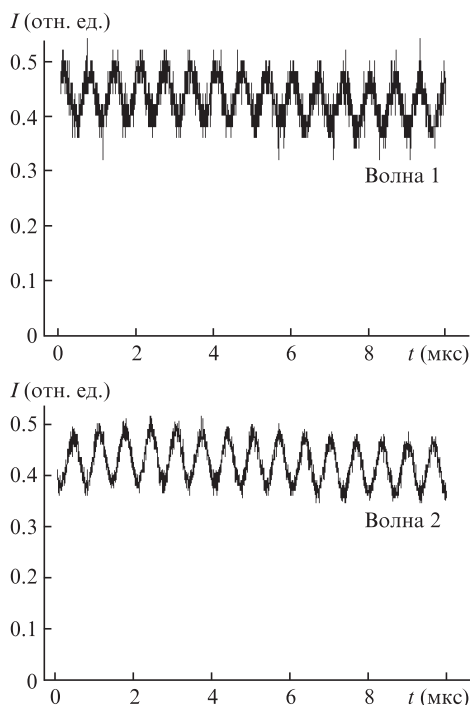


Рис.7. Осциллограммы интенсивностей встречных волн 1 и 2 в режиме биений с равными средними значениями интенсивностей при положении центра магнита в точке $X_C = 1.5$ мм.

Средние интенсивности встречных волн в этом режиме существенно различаются.

В области $3 \text{ мм} < X_C < 5 \text{ мм}$ возникает режим квазипериодических автомодуляционных колебаний с противофазной низкочастотной огибающей, который детально исследован в работе [13].

3.4. Режим биений с равными средними значениями интенсивностей встречных волн

В работе [14] (см. также обзор [1]) впервые показано, что при большой частотной невязимости, значительно превышающей частоту автомодуляционных колебаний, которые возникают при отсутствии невязимости, может наблюдаться переход от режима однонаправленной генерации к режиму биений встречных волн с равными средними значениями интенсивностей. Проведенные в настоящей работе исследования показали, что такой переход наблюдается и в кольцевом чип-лазере. При $X_C = 1.5$ мм в исследуемом чип-лазере имело место выравнивание средних значений интенсивностей встречных волн и возникла противофазная модуляция интенсивностей с частотой

биений $f_b = 1524$ кГц, величина которой определяется частотной невязимостью. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в этом режиме биений приведены на рис.7.

При последующем перемещении магнита в область $X_C < 1.5$ мм лазер снова переходит в стационарный режим однонаправленной генерации, но направление распространения сильной волны изменяется на противоположное (сильной становится волна 1).

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе найден простой и эффективный способ управления динамикой излучения автономного кольцевого чип-лазера на YAG:Nd при воздействии на него внешним постоянным магнитным полем, создающим как частотную, так и значительную амплитудную невязимость. Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенный метод позволяет реализовать и контролировать большое количество разнообразных режимов генерации автономного кольцевого чип-лазера. Экспериментально реализован ряд автомодуляционных и стационарных режимов генерации, режим биений и режим динамического хаоса.

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*, **34**, 487 (2004).
5. Кравцов Н.В. Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 192 (2006).
6. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н. *Квантовая электроника*, **27**, 98 (1999).
7. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Наумкин Н.И., Сидоров С.С., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 649 (2001).
8. Arie A., Schiller S., Gustafson E.K., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **17**, 1205 (1992).
9. Trutna W.R., Donald D.K., Nazarathy M. *Opt. Lett.*, **12**, 248 (1987).
10. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **41**, 504 (2011).
11. Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Ларионцев Е.Г., Макаров А.А. *Квантовая электроника*, **24**, 638 (1997).
12. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Макаров А.А., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 195 (1996).
13. Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **41**, 13 (2011).
14. Доценко А.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **8**, 1504 (1981).