

Режимы генерации твердотельного кольцевого лазера со связанными резонаторами

Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина

На основе проведенных экспериментальных исследований показано, что в твердотельном кольцевом лазере со связанными резонаторами при наложении на активный кристалл $YAG:Nd$ неоднородного магнитного поля можно реализовать следующие режимы генерации: стационарный однопольный режим, автомодуляционные режимы первого и второго рода, а также режим динамического хаоса. Переходы между этими режимами генерации осуществлялись при перемещении магнита по поверхности монокристалла $YAG:Nd$, что позволяло управлять динамикой излучения.

Ключевые слова: твердотельный кольцевой лазер, связанные резонаторы, оптическая невязанность, автомодуляционные колебания, динамический хаос.

1. Введение

Кольцевые лазеры со связанными резонаторами представляют прикладной интерес для гироскопии, поскольку дают возможность повышать чувствительность к вращению при увеличении масштабного коэффициента [1–6]. В работах [1–3] исследования проводились для пассивных лазерных гироскопов (ЛГ), а в [4–6] – для активных ЛГ.

В твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) из-за конкуренции встречных волн стационарный двунаправленный режим является неустойчивым и возникают автомодуляционные режимы генерации. Динамика излучения ТКЛ и возможности управления ей детально исследованы (см., напр., обзор [7]). Режимы генерации ТКЛ со связанными резонаторами до настоящего времени остаются мало изученными. В работах [8, 9] было рассмотрено влияние связанных резонаторов на характеристики излучения ТКЛ в автомодуляционном режиме первого рода. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование режимов генерации ТКЛ со связанными резонаторами, возникающих при наложении неоднородного магнитного поля на активную среду.

2. Экспериментальная установка

Исследуемый ТКЛ со связанными резонаторами показан схематически на рис. 1. Основным резонатором является монокристаллический кольцевой резонатор, изготовленный из высококачественного монокристалла $YAG:Nd$. Такой резонатор обычно используется в кольцевых чип-лазерах [7]. Он имеет форму призмы с одной сферической гранью (радиус кривизны 50 мм) и тремя плоскими гранями полного внутреннего отражения. Геометрический периметр резонатора составляет 2.8 см, угол неплоскостности резонатора равен 80° .

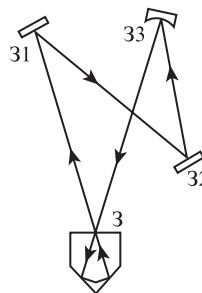


Рис. 1. Схема кольцевого лазера со связанными резонаторами.

Лазерное излучение, выходящее из монокристаллического резонатора через дихроичное зеркало, нанесенное на грань 3, возвращается в монокристаллический кольцевой резонатор с помощью трех зеркал 31, 32 и 33, входящих в состав дополнительного кольцевого резонатора (см. рис. 1). Эти зеркала имеют высокие коэффициенты отражения, близкие к 1. Зеркала 31 и 32 плоские, а зеркало 33 сферическое с радиусом кривизны $R = 50$ см. Длина периметра дополнительного кольцевого резонатора $L_c = 86.5$ см. Накачка в ТКЛ осуществляется полупроводниковым лазерным диодом, излучение которого проходит в монокристаллический резонатор через дихроичное зеркало на грани 3.

На верхней поверхности призмы (рис. 2) располагается магнит M , имеющий форму прямоугольного паралле-

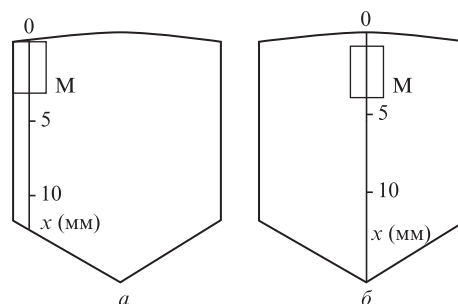


Рис. 2. Два варианта перемещения магнита по верхней поверхности призмы монокристалла $YAG:Nd$: по краю (а) и по средней линии призмы (б); M – магнит, ось x показывает направление его перемещения.

Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, 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 24 апреля 2018 г.

лепипеда. В ходе эксперимента магнит перемещался с помощью микрометрического устройства.

3. Экспериментальные результаты

В настоящей работе экспериментально исследованы режимы генерации ТКЛ со связанными резонаторами, возникающие при наложении на монокристалл YAG:Nd внешнего неоднородного магнитного поля. Исследования проводились при постоянном уровне накачки, превышающие накачки над порогом без внешнего резонатора $\eta = 0.08$. Аналогичные исследования для кольцевого чип-лазера на YAG:Nd были выполнены в [10].

Автомодуляционный режим первого рода. При отсутствии внешнего магнитного поля исследуемый ТКЛ работал в автомодуляционном режиме первого рода. Первые экспериментальные и теоретические исследования этого режима в кольцевых чип-лазерах с полупроводниковой накачкой выполнены в работах [11–14]. В режиме первого рода возбуждаются гармонические противофазные автомодуляционные колебания интенсивностей встречных волн. На рис.3 приведены две осциллограммы интенсивности одной из волн. Осциллограмма 1 соответствует кольцевому чип-лазеру без дополнительного резонатора, в этом случае амплитуда автомодуляционных колебаний примерно вдвое меньше, чем в случае двух связанных резонаторов (осциллограмма 2). Частота автомодуляции в кольцевом чип-лазере равна $f_m = 208$ кГц. В ТКЛ с двумя связанными резонаторами частота f_m становится равной 180 кГц.

Перестраивая периметр дополнительного резонатора на величину порядка длины волны лазерного излучения, можно уменьшить амплитуду автомодуляционных колебаний и увеличить частоту f_m [8, 9]. Для проведения экспериментальных исследований длина периметра L_c настраивалась таким образом, чтобы амплитуда автомодуляционных колебаний стала максимальной (при фиксированном уровне накачки). Такая настройка дополнительного резонатора соответствует синфазной связи двух резонаторов [8, 9]. Отметим, что в настоящей работе удалось обеспечить большую стабильность периметра L_c , чем в [8], благодаря чему синфазная связь резонаторов сохранялась в течение всего времени наблюдения (без перескоков к противофазной связи).

Автомодуляционный режим второго рода. Перемещение магнита по поверхности монокристалла YAG:Nd осуществлялось в двух вариантах: по краю (рис.2,а) или по середине поверхности монокристалла (рис.2,б). Обсудим

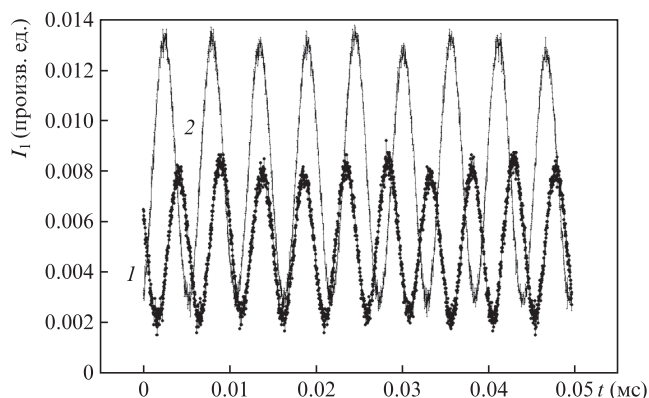


Рис.3. Осциллограммы интенсивности излучения одной из волн в автомодуляционном режиме первого рода (см. текст).

результаты, полученные для первого варианта расположения магнита.

Вследствие эффекта Фарадея при наложении внешнего магнитного поля на монокристалл YAG:Nd в ТКЛ возникают как частотная, так и амплитудная невязимости кольцевого резонатора, которые изменяются при перемещении магнита [7, 10]. При начальном положении магнита, соответствующем $x = 0$ (сферическая грань призмы совпадает с верхней гранью магнита), ТКЛ с двумя резонаторами работает в стационарном режиме однонаправленной генерации. Переход в этот режим, очевидно, происходит из-за амплитудной невязимости кольцевого резонатора, возникающей вследствие эффекта Фарадея при наложении внешнего магнитного поля.

Магнит перемещался с шагом $h = 1$ мм. При положениях магнита $x = 0$ и 1 мм наблюдается стационарный режим однонаправленной генерации. При дальнейших перемещениях магнита ($x = 2$ и 3 мм) в ТКЛ с двумя резонаторами возникает автомодуляционный режим второго рода. Как показали экспериментальные и теоретические исследования [15–18], этот режим существует в ТКЛ при длинах периметра $L_c \sim 1$ м. В кольцевых чип-лазерах периметр значительно меньше и связь встречных волн через обратное рассеяние значительно больше, что приводит к тому, что этот режим не удается наблюдать в чип-лазерах. Ситуация изменяется при наличии дополнительного резонатора.

На рис.4,а (при $x = 2$ мм) и рис.4,б (при $x = 3$ мм) приведены осциллограммы интенсивности одной из волн в автомодуляционном режиме второго рода. В этом режиме происходит низкочастотная коммутация направления генерируемого излучения с частотой $f = 200$ Гц. Как вид-

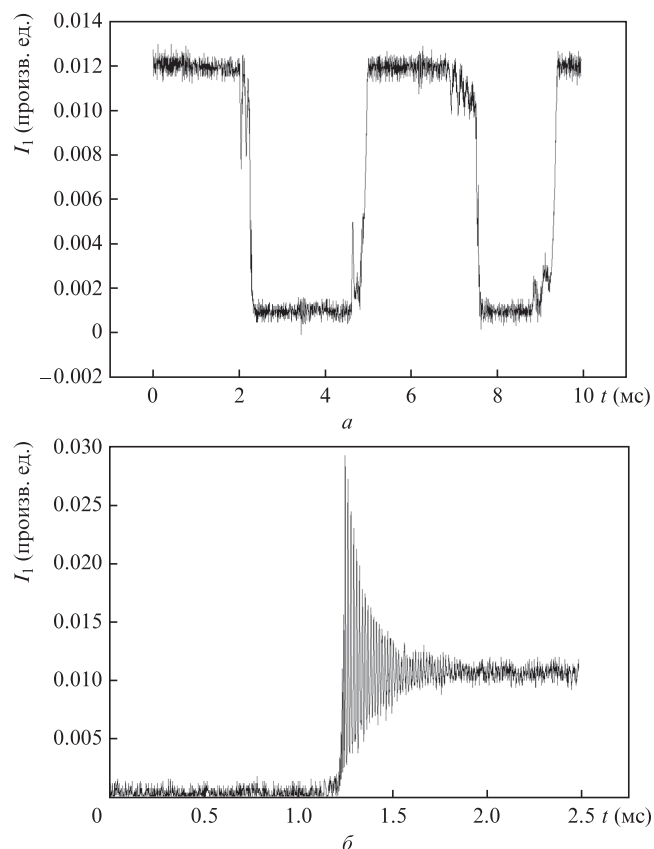


Рис.4. Осциллограмма интенсивности излучения одной из волн в автомодуляционном режиме второго рода при $x = 2$ (а) и 3 мм (б).

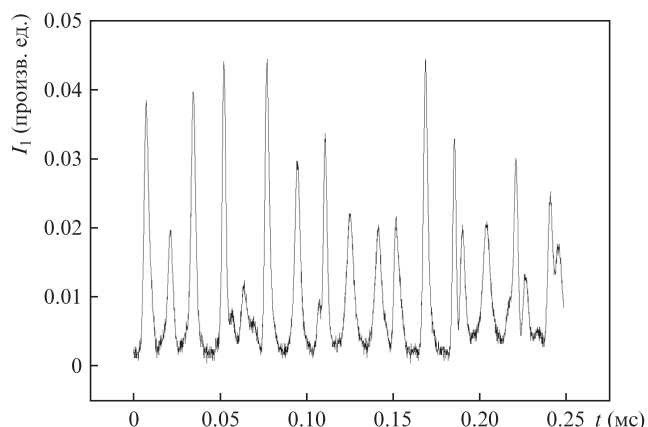


Рис.5. Оциллограмма интенсивности излучения одной из волн в режиме динамического хаоса.

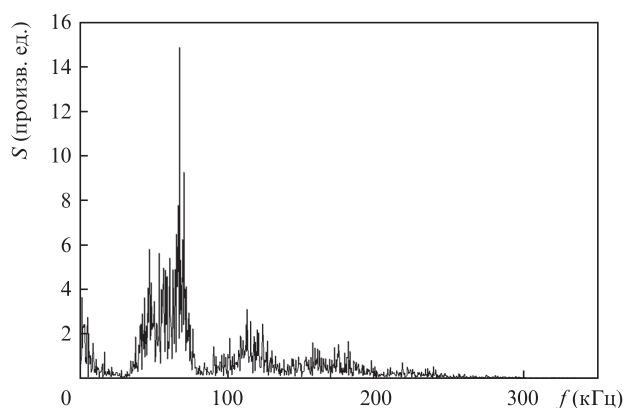


Рис.6. Спектр излучения одной из волн в режиме динамического хаоса.

но из рис.4,б, при изменении направления излучения возникает переходный процесс, сопровождаемый затухающими релаксационными колебаниями.

При последующем перемещении магнита по первому варианту (по краю призмы) в области $x \geq 4$ мм наблюдается стационарный режим однонаправленной генерации.

Режим динамического хаоса. При втором варианте перемещения магнита (рис.2,б) получены следующие результаты. В области положений магнита $0 < x \leq 7$ мм ТКЛ со связанными резонаторами работает в режиме динамического хаоса. На рис.5 показана зависимость от времени интенсивности одной из волн в этом режиме, а на рис.6 приведен спектр интенсивности излучения.

Как видно из рис.5 и 6, в режиме хаоса излучение имеет вид последовательности нерегулярных пиков, и в непрерывном спектре интенсивности возникают широкие

максимумы на частотах, кратных основной релаксационной частоте $f_{r0} = 60$ кГц.

При положениях магнита в области $x > 7$ мм наблюдается автомодуляционный режим первого рода.

Итак, в настоящей работе показано, что в ТКЛ со связанными резонаторами при наложении на кристалл YAG: Nd неоднородного магнитного поля можно реализовать следующие режимы генерации: стационарный однонаправленный режим, автомодуляционные режимы первого и второго рода, а также режим динамического хаоса. Автомодуляционный режим второго рода удалось наблюдать лишь при наличии дополнительного резонатора, в кольцевом чип-лазере без дополнительного резонатора этот режим генерации отсутствовал. При перемещении магнита по поверхности монокристалла YAG: Nd можно управлять динамикой излучения, осуществляя переходы между указанными режимами генерации.

- Smith D.D., Chang H., Myneni K., Rosenberger A.T. *Phys. Rev. A*, **89**, 053804 (2014).
- Peng C., Li Z., Xu A. *Opt. Express*, **15**, 3864 (2007).
- Terrel M.A., Dignonnet M.J.F., Fan S. *Proc. SPIE*, **7612**, 76120B (2010).
- Schaar J.E., Yum H.N., Shahriar S.M. *Proc. SPIE*, **7949**, 794914 (2011).
- Han X., Luo H., Qu T., Wang Z., Yuan J., Bin Z. *J. Opt.*, **16**, 125401 (2014).
- Wang Z., Yuan B., Xiao G., Fan Z., Yuan J. *Appl. Opt.*, **54**, 9568 (2015).
- Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 192 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 192 (2006)].
- Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **48**, 1 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 1 (2018)].
- Золотоверх И.И., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **48**, 510 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 510 (2018)].
- Аулова Т.В., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Фирсов В.В., Чекина С.Н. *Квантовая электроника*, **43**, 477 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 477 (2013)].
- Гарбузов Д.З., Дедыш В.В., Кочергин А.В., Кравцов Н.В., Наний О.Е., Надточеев В.Е., Стругов Н.А., Фирсов В.В., Шелаев А.Н. *Квантовая электроника*, **16**, 2423 (1989) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **19**, 1557 (1989)].
- Голяев Ю.Д., Гарбузов Д.З., Кочергин А.В., Кравцов Н.В., Надточеев В.Е., Наний О.Е. *Изв. РАН. Серия физическая*, **56**, 163 (1992).
- Бойко Д.Л., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **24**, 653 (1997) [*Quantum Electron.*, **27**, 635 (1997)].
- Бойко Д.Л., Голяев Ю.Д., Леженин Д.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 235 (1997) [*Quantum Electron.*, **27**, 229 (1997)].
- Полушкин Н.И., Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **10**, 1461 (1983) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **13**, 950 (1983)].
- Khandokhin P.A., Khanin Ya.I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **89**, 226 (1985).
- Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **15**, 1993 (1988) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **18**, 1248 (1988)].
- Khandokhin P.A., Khanin Ya.I., Koryukin I.V. *Opt. Commun.*, **81**, 297 (1991).