

# Взаимодействие встречных волн в кольцевом лазере на кристалле $\text{Nd:YVO}_4$

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

*Экспериментально исследованы стационарный режим двунаправленной генерации и автомодуляционные режимы в твердотельном кольцевом лазере (ТКЛ) на кристалле  $\text{Nd:YVO}_4$  при наличии фазовой невязимости кольцевого резонатора. Обнаружено, что спектр излучения в режиме синхронизации частот встречных волн значительно более узок, чем в ТКЛ на  $\text{Nd:YAG}$ . С ростом фазовой невязимости в режиме синхронизации происходит подавление одной из встречных волн, и этот режим не переходит в режим биений.*

**Ключевые слова:** твердотельный кольцевой лазер, синхронизация частот встречных волн, оптическая невязимост, автомодуляционные колебания.

## 1. Введение

Создание лазерных гироскопов (ЛГ) на основе твердотельного кольцевого лазера (ТКЛ) дает возможность устранить некоторые недостатки, свойственные гироскопам на кольцевом газовом лазере (наличие в резонаторе заполненного газом объема, необходимость поддержания газового разряда). В исследованиях по ТКЛ, ориентированных на применение в гироскопии, большинство работ относится к лазерам на кристалле иттрий-алюминиевого граната (YAG). Отметим, что ТКЛ на  $\text{Nd:YAG}$ , работающие в режиме биений встречных волн, продемонстрировали частотные характеристики, которые близки к достигнутым в высокоточных газовых ЛГ [1, 2].

Кольцевой лазер на кристалле ванадата иттрия  $\text{YVO}_4$  можно рассматривать как один из перспективных вариантов генератора для ЛГ на основе ТКЛ, поскольку сечение лазерного перехода на длине волны 1.06 мкм в кристалле  $\text{Nd:YVO}_4$  в 4.6 раза больше, чем в  $\text{Nd:YAG}$ , что позволяет снижать пороги генерации и уменьшать длину активной области.

В работах [3, 4] в ТКЛ на  $\text{Nd:YVO}_4$  была экспериментально исследована двунаправленная генерация в режиме пассивной синхронизации аксиальных мод. Синхронизация мод (СМ) возникала при введении в резонатор нелинейного поглотителя. В режиме СМ внутри кольцевого резонатора во встречных направлениях распространяются ультракороткие импульсы света, которые переключаются внутри нелинейного поглотителя. За счет обратного рассеяния на поглотителе возникают сильная связь встречных волн и большая область захвата (порядка 10 град/с), а вне области захвата наблюдается режим биений. Аналогичные результаты для двунаправленной генерации в режиме СМ были получены в работе [5].

Е.Г. Ларионцев, В.В. Фирсов, С.Н. Чекина. НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2; e-mail: e.lariontsev@yahoo.com

Поступила в редакцию 9 сентября 2019 г., после доработки – 24 мая 2021 г.

Экспериментальные исследования двунаправленной генерации в ТКЛ на  $\text{Nd:YVO}_4$  в случае свободной генерации, проведенные в работе [6], показали, что конкуренция встречных волн приводит к возникновению следующих автомодуляционных режимов генерации: режима противофазной модуляции интенсивностей встречных волн, режима синфазной модуляции интенсивностей встречных волн и режима динамического хаоса.

В отличие от ТКЛ на  $\text{Nd:YAG}$ , которым были посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования режимов генерации, двунаправленные кольцевые лазеры на кристалле  $\text{YVO}_4$  изучены в значительно меньшей степени. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование режимов свободной генерации двунаправленного ТКЛ на  $\text{Nd:YVO}_4$ .

## 2. Экспериментальная установка

Исследуемый ТКЛ с плоским четырехзеркальным резонатором схематически показан на рис. 1. Зеркала резонатора 31, 32 являются плоскими, 33 – сферическое зеркало с радиусом кривизны  $R = 50$  см. Четвертое дихроичное зеркало напылено на грань лазерного кристалла (ЛК)  $\text{Nd:YVO}_4$ , имеющего форму прямоугольной пластины размером  $5 \times 5 \times 2.5$  мм, длина активного элемента равна 2.5 мм. Накачка осуществляется полупроводниковым лазерным диодом, его излучение проходит в резонатор че-

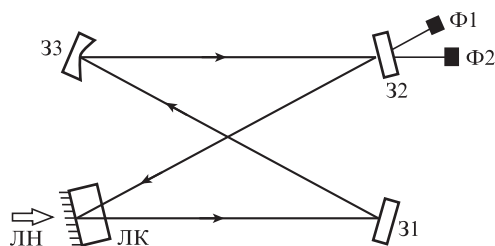


Рис. 1. Схема кольцевого лазера: 31, 32 – плоские зеркала; 33 – сферическое зеркало с радиусом кривизны  $R = 50$  см; ЛК – кристалл ванадата иттрия  $\text{Nd:YVO}_4$  с напыленным на его поверхности дихроичным зеркалом; ЛН – луч накачки; Ф1, Ф2 – фотоприемники лазерного излучения.

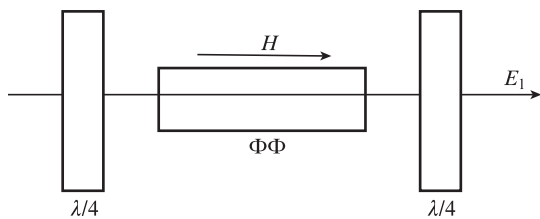


Рис.2. Схема фазового фарадеевского невзаимного элемента:  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка; ФФ – фарадеевский фазовращатель (кристалл германата висмута в магнитном поле соленоида  $H$ );  $E_1$  – проходящая волна.

рез это дихроичное зеркало и полностью поглощается на длине активного элемента.

Схема, в которой одно из зеркал резонатора напылено на поверхность активного элемента, имеет ряд достоинств. Во-первых, пространство внутри резонатора не занято активной средой, и остается больше места для размещения там других элементов (например, фарадеевского элемента). Во-вторых, луч накачки (ЛН) лазерного диода поглощается в пластине ЛК и не попадает внутрь резонатора. В-третьих, лучи встречных волн, генерируемых внутри резонатора, падают на поверхность активного элемента под углом, отличным от  $90^\circ$ , что уменьшает связь встречных волн через обратное рассеяние на этой поверхности.

Лазерное излучение, генерируемое в исследуемом ТКЛ, имеет линейную поляризацию, направленную под углом  $90^\circ$  к плоскости резонатора. Лучи встречных волн выводятся из кольцевого резонатора через зеркало 32 и регистрируются фотоприемниками Ф1 и Ф2. Длина периметра кольцевого резонатора  $L_c = 90$  см.

В некоторых экспериментах для управления фазовой невзаимностью кольцевого резонатора внутрь резонатора между зеркалом, напыленным на ЛК, и зеркалом 31 (см. рис.1) помещался фазовый фарадеевский невзаимный элемент (ФФНЭ), работа которого поясняется на рис.2.

Линейно поляризованная волна  $E_1$ , пройдя через четвертьволновую пластинку  $\lambda/4$ , превращается в циркулярно поляризованную и попадает на кристалл  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  [7], обладающий высокой магнитооптической активностью. В этом кристалле, помещенном в соленоид, который создает магнитное поле, встречные волны получают дополнительные фазовые сдвиги  $\Delta\varphi_{1,2}$  противоположного знака ( $\Delta\varphi_1 = -\Delta\varphi_2$ ), пропорциональные величине магнитного поля  $H$ . Выйдя из кристалла германата висмута, циркулярно поляризованная волна проходит через другую пластинку  $\lambda/4$  и снова становится линейно поляризованной. Такой невзаимный элемент создает в резонаторе фазовую оптическую невзаимность  $\Omega = 2\Delta\varphi_1/T$ , где  $T$  – время обхода светом периметра резонатора.

### 3. Режим синхронизации встречных волн

В исследуемом ТКЛ наблюдалась стационарная генерация двух встречных волн с постоянными интенсивностями. Оптические частоты полей встречных волн оказываются равными, и этот режим обычно называют режимом синхронизации встречных волн. В случае равных интенсивностей встречных волн в кольцевом резонаторе образуется стоячая волна.

С помощью анализатора спектра АКС-1301 было установлено, что генерация на одной аксиальной моде в

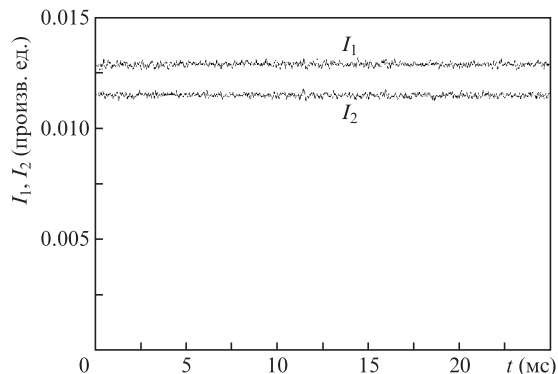


Рис.3. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в режиме синхронизации при  $\eta = 0.05$ .

этом режиме существует только в области малых превышений мощности накачки  $P$  над пороговым уровнем  $P_{th}$  – при  $\eta = P/P_{th} - 1 < 0.02$ . В этой области в спектрах интенсивностей встречных волн отсутствуют высокочастотные компоненты на частоте межмодовых биений  $c/L_c = 335$  МГц. В области превышений над порогом  $0.02 < \eta < 0.1$  возбуждаются две продольные моды, и в спектрах интенсивностей волн возникает компонента на частоте межмодовых биений. При превышениях  $\eta > 0.1$  в спектрах излучения наблюдаются компоненты на частотах 335 и 670 МГц, что свидетельствует о возбуждении в этой области трех продольных мод.

На рис.3 показаны осциллограммы интенсивностей встречных волн при  $\eta = 0.05$ . Видно, что интенсивности встречных волн  $I_1$  и  $I_2$  близки по величине. В исследуемом ТКЛ в режиме синхронизации частот встречных волн наблюдалась высокая стабильность интенсивностей излучения  $I_1$  и  $I_2$ .

### 4. Влияние фазовой невзаимности на режим синхронизации

В настоящей работе было экспериментально исследовано влияние фазовой невзаимности кольцевого резонатора на режим синхронизации встречных волн. Для создания фазовой невзаимности внутрь кольцевого резонатора помещался ФФНЭ (см. рис.2). Аналогичная схема для ТКЛ на  $\text{Nd}:\text{YAG}$  с фарадеевским невзаимным элементом описана в работе [8].

На рис.4 для режима синхронизации встречных волн в исследуемом ТКЛ показана зависимость интенсивностей встречных волн  $I_1$  и  $I_2$  от тока  $J$  в соленоиде, создающем магнитное поле в ФФНЭ. Видно, что при увеличении фазовой невзаимности, пропорциональной току  $J$ , происходит подавление одной из встречных волн. Разность интенсивностей меняет знак при изменении направления тока: при положительных  $J$  подавляется волна  $I_1$ , а при отрицательных – волна  $I_2$ . Проведенные исследования показали, что при увеличении фазовой невзаимности исследуемый ТКЛ остается в режиме синхронизации и не переходит в режим биений.

Поясним качественно явления, происходящие в ТКЛ, который работает в режиме синхронизации частот встречных волн. В активной среде ТКЛ линия усиления однородно уширена, а частоты встречных волн в режиме синхронизации равны друг другу. Поэтому в поле двух встречных волн, имеющих равные частоты, инверсная населенность выжигается пространственно неоднородно

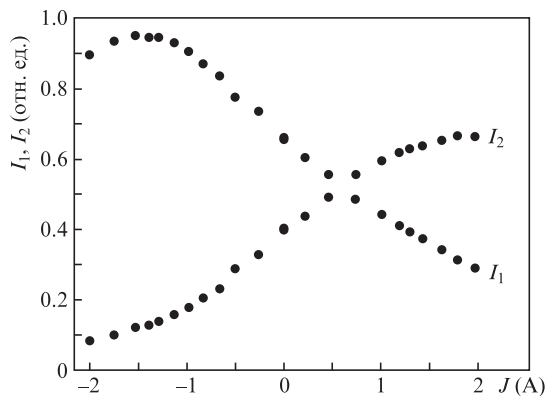


Рис.4. Зависимость интенсивностей встречных волн от тока в катушке, создающей магнитное поле.

и возникают периодические решетки инверсной населенности с периодом  $\lambda/2$ . В результате в ТКЛ из-за брэгговских отражений на этих решетках коэффициенты усиления для встречных волн становятся неравными: волна с большей интенсивностью имеет больший коэффициент усиления. Такое неравенство коэффициентов усиления должно было бы привести к подавлению одной из встречных волн. Однако этому препятствует наличие связи встречных волн из-за обратного рассеяния внутри резонатора. При достаточно сильной связи через обратное рассеяние режим синхронизации становится устойчивым.

Рассмотрим качественно влияние фазовой оптической невязимости на режим синхронизации. В случае достаточно сильной связи, обеспечивающей устойчивость стоячей волны, при увеличении фазовой оптической невязимости растет неравенство интенсивностей встречных волн (одна волна возрастает, а другая подавляется). При этом разность фаз встречных волн остается практически неизменной. При достаточно большой фазовой невязимости одна из волн практически полностью подавляется, однако разность фаз встречных волн не изменяется настолько, чтобы режим синхронизации перестал существовать и возник режим биений встречных волн. Такой режим с неограниченной шириной полосы синхронизации характерен для ТКЛ, впервые он наблюдался в кольцевом лазере на Nd:YAG в работе [9].

## 5. Автомоуляционный режим второго рода

При изменении юстировки кольцевого резонатора лазера (при небольших поворотах и перемещениях зеркал резонатора) в исследуемом ТКЛ можно получить генерацию в двух автомоуляционных режимах: автомоуляционном режиме второго рода и в режиме периодической синфазной автомоуляции интенсивностей встречных волн. Автомоуляционный режим второго рода (иногда его также называют режимом низкочастотных переключений направления генерации ТКЛ) хорошо известен по исследованиям ТКЛ на Nd:YAG (см. обзор [10]). Такой режим может возникать, когда связь через обратное рассеяние недостаточна для обеспечения устойчивости режима синхронизации встречных волн, но приводит к неустойчивости режима стационарной однонаправленной генерации. Эти условия выполняются либо при достаточно большой отстройке частоты генерации от центра линии усиления, либо при наличии тонкой структуры линии усиления [11, 12], обусловленной тем, что в спектре

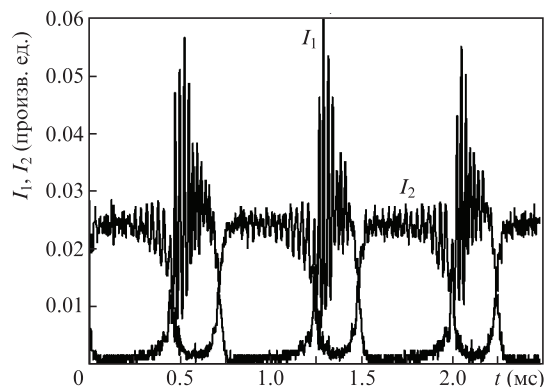


Рис.5. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в автомоуляционном режиме второго рода при  $\eta = 0.05$ .

люминесценции Nd:YAG имеются две близкие линии. На рис.5 показаны осциллограммы интенсивностей встречных волн в автомоуляционном режиме второго рода для исследуемого ТКЛ на Nd:YVO<sub>4</sub>. Видно, что на интервале времени длительностью примерно 0.5 мс генерация в ТКЛ близка к однонаправленной, затем интенсивности встречных волн начинают выравниваться, слабая волна продолжает расти и после того, как интенсивности становятся равными. В результате происходит периодическая низкочастотная смена направлений однонаправленной генерации.

В отличие от стационарного режима синхронизации частот встречных волн, в исследуемом лазере автомоуляционный режим второго рода существует в течение небольшого промежутка времени (порядка минуты), после чего он переходит в стационарный режим синхронизации встречных волн. По-видимому, это связано с тем, что область существования такого автомоуляционного режима достаточно узкая, и ТКЛ из-за тепловой перестройки кольцевого резонатора выходит из нее.

## 6. Синфазный автомоуляционный режим

Режим периодической синфазной автомоуляции в ТКЛ на Nd:YAG наблюдался в [13] при создании несимметричной связи встречных волн с помощью дополнительного зеркала, расположенного вне резонатора и возвращающего один из лучей обратно в резонатор. Синфазная автомоуляция интенсивностей связана с самовозбуждением релаксационных колебаний из-за неустойчивости стационарной двунаправленной генерации. На рис.6 приведены осциллограммы интенсивностей встречных волн в режиме синфазной автомоуляции для исследуемого ТКЛ на Nd:YVO<sub>4</sub>. Частота релаксационных колебаний  $f = 65$  кГц.

Этот автомоуляционный режим, также как и автомоуляционный режим второго рода, можно наблюдать в исследованном ТКЛ в течение небольшого промежутка времени (порядка минуты) после настройки резонатора на область его существования.

## 7. Автомоуляционный режим первого рода

Автомоуляционный режим первого рода, для которого характерна противофазная синусоидальная автомоуляция интенсивностей встречных волн, в исследуемом ТКЛ удалось получить при увеличении связи встречных

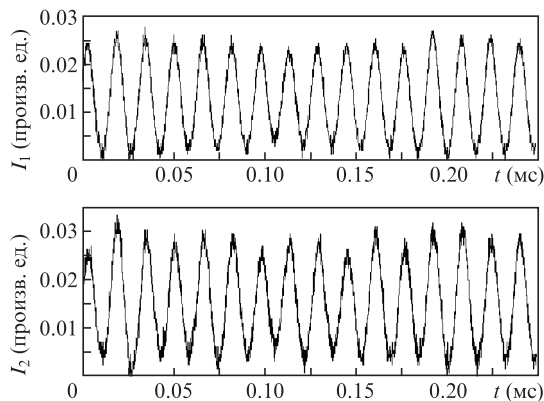


Рис.6. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в режиме периодической синхронной автомодуляции при  $\eta = 0.05$ .

волн через обратное рассеяние. Для этого внутрь кольцевого резонатора помещался кристалл граната. Излучение накачки в этом кристалле отсутствовало, и он играл роль дополнительного источника обратного рассеяния в резонаторе. Частота противофазной автомодуляции интенсивностей встречных волн при небольших поворотах кристалла граната изменялась в диапазоне 50–500 кГц. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в автомодуляционном режиме первого рода с частотой автомодуляции  $f_{\text{ам}} = 83$  кГц приведены на рис.7.

Как показали ранее проводившиеся исследования (см., напр., обзор [10]), этот режим возникает в ТКЛ, когда связь встречных волн через обратное рассеяние близка к консервативной (рассеяние на неоднородностях показателя преломления) и величина связи недостаточна для обеспечения устойчивости стационарной двунаправленной генерации. В покоящемся ТКЛ (при фазовой невязимности резонатора  $\Omega = 0$ ) частота автомодуляционных колебаний  $\omega_{\text{ам}}$  равна модулю коэффициентов обратной связи  $m$ . Зависимость частоты  $\omega_{\text{ам}}$  от фазовой невязимно-

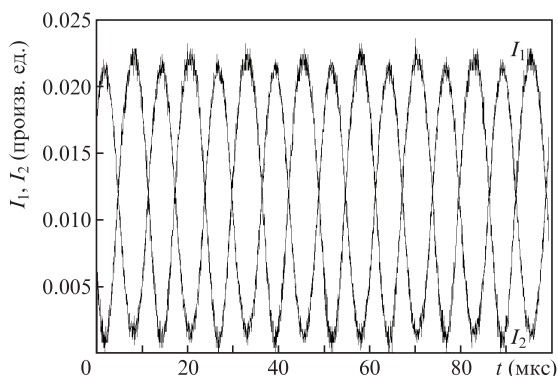


Рис.7. Осциллограммы интенсивностей встречных волн в автомодуляционном режиме первого рода при  $\eta = 0.05$ .

сти кольцевого резонатора определяется приближенной формулой  $\omega_{\text{ам}} = \sqrt{m^2 + \Omega^2}$ . Простое качественное объяснение этого автомодуляционного режима было дано в [14], где он рассматривался как стационарный двухмодовый режим генерации. Гармоническая модуляция интенсивности излучения в этом режиме является результатом биения двух мод.

## 8. Заключение

Проведенные эксперименты показали, что при отсутствии внутри кольцевого резонатора каких-либо дополнительных элементов исследуемый ТКЛ работает в стационарном режиме синхронизации встречных волн. Такой режим наблюдался ранее в ТКЛ на кристалле Nd:YAG, однако спектр излучения в этом режиме для Nd:YAG-лазера оказывался значительно более широким. Существенное сужение спектра генерации, по-видимому, связано с малой длиной (2.5 мм) лазерного кристалла Nd:YVO<sub>4</sub>.

С ростом фазовой невязимности в режиме синхронизации происходит подавление одной из встречных волн, и этот режим не переходит в режим биений. Для такого перехода в исследованном ТКЛ необходимо ослабить конкуренцию встречных волн (например, с помощью цепи обратной связи, как было сделано в [1, 2]).

1. Schwartz S., Gutty F., Feugnet G., Bouyer Ph., Pocholle J.-P. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 183901 (2008).
2. Schwartz S., Gutty F., Feugnet G., Loil E., Pocholle J.-P. *Opt. Lett.*, **34**, 3884 (2009).
3. Liu Y., Sun L., Qiu H., Wang Y., Tian Q., Ma X. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 187 (2007).
4. Cai Z.Q., Yao J.Q., Wang P., Wang Y.G., Zhang Z.G. *Chin. Phys. Lett.*, **24**, 1270 (2007).
5. Kubecek V., Grepl O., Cech M., Diels J.-C., Arissian L. *Proc. SPIE*, **7994**, 799405 (2011).
6. Qiu H., Liu Y., Sun L., Tian Q. *Proc. SPIE*, **6020**, 60202P (2005).
7. Каминский А.А., Кравцов Н.В., Наумкин Н.И., Чекина С.Н., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **30**, 283 (2000) [*Quantum Electron.*, **30**, 283 (2000)].
8. Schwartz S., Feugnet G., Pocholle J.-P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **30**, 2157 (2013).
9. Клочан Е.Л., Корниенко Л.С., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г., Шелаев А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **17**, 405 (1973).
10. Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. *Квантовая электроника*, **36**, 192 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 192 (2006)].
11. Khandokhin P.A., Khanin Ya.I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **2**, 226 (1985).
12. Полушкин Н.И., Хандохин П.А., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **10**, 1461 (1983) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **13**, 950 (1983)].
13. Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н., Макаров А.А., Фирсов В.В. *Квантовая электроника*, **23**, 195 (1996) [*Quantum Electron.*, **26**, 189 (1996)].
14. Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **19**, 762 (1992) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **22**, 703 (1992)].