

**ТЕРМОНАВЕДЕННОЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ И МОДОВАЯ СЕЛЕКЦИЯ
В РЕЗОНАТОРЕ Nd:YAG-ЛАЗЕРА С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ**

**М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. Н. Дудиков, А. Г. Рябцев,
Г. И. Рябцев*, П. О. Татура, П. В. Шпак, М. А. Щемелев**

УДК 535.37+621.371.378

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-621-625>

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

(Поступила 23 августа 2022)

Исследованы режимы работы оптической системы в составе компактного импульсного задающего диодно-накачиваемого Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности и трехкристальной (КТР) кольцевой ячейки параметрического генератора света. Экспериментально показано, что частотно-селективные свойства пассивного модулятора добротности в режиме “естественной селекции мод” усиливаются путем создания в резонаторе интерференционно-поляризационного фильтра Лيو с фазовой пластиной в виде лазерного активного элемента с термонаведенным двулучепреломлением и поляризатора. Такой фильтр Лيو возникает в резонаторе Nd:YAG-лазера при работе в условиях относительно высоких значений энергии и частоты повторения импульсов излучения (60–100 мДж, 20 Гц). Совместное действие процесса “естественной селекции мод” и фильтра Лيو обеспечивает устойчивое функционирование Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности в режиме одномодовой генерации (ширина полосы генерации <57 МГц). Задающий одномодовый импульсный Nd:YAG-лазер ($\lambda = 1.06$ мкм) позволяет более чем в 1.5 раза уменьшить энергию импульсов, подаваемых на вход параметрического генератора света при сохранении заданного уровня энергии выходных импульсов (30 мДж, $\lambda = 1.57$ мкм). Дополнительное повышение эффективности параметрического генератора света преобразования достигается введением в резонатор задающего лазера двухлинзового 1.3 $\times$ телескопа.

Ключевые слова: Nd:YAG-лазер, поперечная диодная накачка, пассивная модуляция добротности, одночастотный моноимпульсный режим генерации, параметрический генератор света.

Operating regimes of an optical system consisted of compact pulsed master diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser and triple-crystal (KTP) ring cell of the optical parametric oscillator have been investigated. It has been experimentally shown that frequency-selective properties of a passive Q-switched unit in the “natural mode selection” are enhanced by creating a polarization interference filter Lyot with the phase plate in the form of a laser active element with the thermally induced birefringence and a polarizer. Such filter Lyot appears in the Nd:YAG laser cavity during operation at relatively high energy and repetition rate of radiation pulses (60–100 mJ, 20 Hz). The combined action of the “natural mode selection” process and the Lyot filter ensures the stable operation of a passive Q-switched Nd:YAG laser in the single frequency lasing mode (the lasing bandwidth is less than 57 MHz). The master single frequency pulsed Nd:YAG laser ($\lambda = 1.06$ μm) allows reducing the energy of pulses applied to the input of the optical parametric oscillator by more than 1.5 times while maintaining the specified energy level of the output pulses (30 mJ, $\lambda = 1.57$ μm). An additional increase in the efficiency of the optical parametric oscillator conversion is achieved by introducing a two-lens 1.3 $\times$ telescope into the master laser cavity.

Keywords: Nd:YAG laser, side diode pump, passive Q-switching, single frequency monopulse lasing, optical parametric oscillator.

THERMALLY INDUCED BIREFRINGENCE AND MODE SELECTION IN CAVITY OF PASSIVELY Q-SWITCHED DIODE PUMPED Nd:YAG LASER

M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. N. Dudikov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev*, P. O. Tatura, P. V. Shpak, M. A. Shchemelev (B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by)

Введение. Компактные моноимпульсные твердотельные лазеры на основе неодимсодержащих сред с энергиями импульсов на уровне сотен миллиджоулей находят все более широкое применение в спектроскопии, метрологии, лидарных комплексах [1—3]. Достаточно часто такие излучатели ($\lambda = 1.06$ мкм) используются как задающие источники излучения импульсных параметрических генераторов света (ПГС), генерирующих в условно безопасном для органов зрения спектральном диапазоне 1.5—1.6 мкм [4, 5].

Высокая эффективность работы ПГС достигается, когда задающий лазер генерирует в одномодовом режиме малорасходящийся пучок излучения [6]. (Под многомодовым излучением подразумевается излучение с большим числом продольных мод, а под одномодовым — с одной продольной модой.) Наиболее просто одномодовый моноимпульсный режим генерации реализуется методом “естественной селекции мод” [7] в лазерах с пассивной модуляцией добротности [8, 9]. При необходимости степень селективности повышается внедрением в лазерный резонатор фильтра Лию [9—11].

В настоящей работе разработан и создан компактный высокоэффективный моноимпульсный одномодовый Nd:YAG-лазер с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности для применения в качестве задающего импульсного источника ПГС. Селективные свойства пассивного модулятора добротности (режим “естественной селекции мод”) усилены путем формирования внутри резонатора интерференционно-поляризационного фильтра Лию, в котором роль фазовой пластины играет лазерный активный элемент (АЭ) с термонаведенным двулучепреломлением. Расходимость выходного лазерного пучка уменьшена с помощью телескопической системы. Эффективность работы созданного задающего лазера проанализирована применительно к трехкристальному кольцевому ПГС.

Эксперимент. Оптическая блок-схема исследуемого ПГС с моноимпульсным задающим Nd:YAG-лазером представлена на рис. 1. Цилиндрический АЭ лазера диаметром 5 мм и длиной 50 мм изготавливался из кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов неодима 1.1 ат. %. Торцы АЭ просветлялись на длину волны 1.06 мкм. Боковые поверхности АЭ покрывались клеящим светорассеивающим слоем [12, 13]. АЭ со светорассеивающим слоем размещался внутри сапфировой трубки (рис. 1, вставка). Возбуждение АЭ проводилось тремя мощными матрицами лазерных диодов (НПП “Инжект”, Саратов, Россия) с использованием поперечной конфигурации блока накачки АЭ. Длина резонатора задающего Nd:YAG-лазера 300 мм. Все исследования проводились при комнатной температуре окружающей среды.

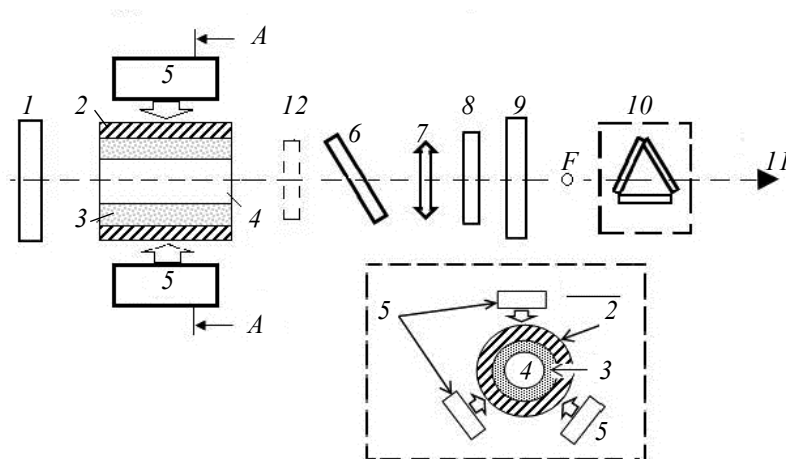


Рис. 1 Оптическая схема параметрического генератора света с моноимпульсным задающим Nd:YAG-лазером: 1 — глухое зеркало, 2 — сапфировая трубка, 3 — светорассеивающий слой, 4 — Nd:YAG активный элемент, 5 — блоки поперечной накачки АЭ матрицами лазерных диодов, 6 — поляризатор, 7 — 1.3× телескоп, 8 — пассивный затвор (Cr:YAG), 9 — выходное зеркало лазера (40 %), 10 — трехкристальная (КТР) кольцевая ячейка ПГС, 11 — выходной пучок ПГС (1.57 мкм), 12 — фазовая пластина $\lambda/4$ (устанавливалась дополнительно к основным элементам резонатора); на вставке схематично показан поперечный разрез лазерного квантрона

Пассивная модуляция добротности обеспечивалась кристаллом Cr:YAG с начальным пропусканием 40 %. Двухлинзовый 1.3× телескоп (линзы просветлены, $\lambda = 1.06$ мкм) выполнял главным образом три функции. Во-первых, в результате сужения диаметра внутрирезонаторной моды достигалась более высокая плотность энергии излучения. В результате уменьшался коэффициент поглощения затвора в просветленном состоянии, а следовательно, и вносимые при этом оптические потери. Во-вторых, таким образом расходимость выходного лазерного пучка сводилась к 1.0 мрад. В-третьих, ограниченная апертура телескопа способствовала подавлению поперечных мод генерации при частичной компенсации тепловой линзы в АЭ.

Задающий Nd:YAG-лазер генерировал на $\lambda = 1.06$ мкм. Его выходной пучок (рис. 1, точка F) подавался на вход кольцевой трехкристальной ячейки ПГС, в качестве нелинейных элементов которой использовались кристаллы КТР. На выходе ПГС формировался пучок излучения с $\lambda = 1.57$ мкм. Путем сопоставления энергии световых импульсов на выходе и на входе в ячейку ПГС оценивалась эффективность работы задающего лазера.

Первый этап исследований проводился при частоте следования световых импульсов $f = 20$ Гц. В экспериментах использовались задающие Nd:YAG-лазеры двух типов.

В состав лазера первого типа входил квантрон с “мягкой вклейкой” АЭ в сапфировую трубку, при которой светорассеивающий слой оказывал минимальное механическое воздействие на боковые грани АЭ (минимизировались толщина слоя и содержание рассеивающих частиц [13]). Лазер работал в моноимпульсном многомодовом режиме, длительность генерируемых импульсов не превышала 9 нс при энергии 100 мДж. При подаче таких импульсов на вход ячейки ПГС на выходе параметрического генератора света формировались импульсы излучения с энергией 30 мДж ($\lambda = 1.57$ мкм).

В режим моноимпульсной одномодовой генерации задающий лазер с “мягкой вклейкой” АЭ переключался только при внесении в резонатор дополнительно четвертьволновой фазовой пластины 12 (рис. 1). При этом энергия генерируемых импульсов длительностью 15—28 нс падала до 60—65 мДж. Установление одночастотного режима генерации фиксировалось по кольцам интерферограммы (рис. 2, а) или по гладкому контуру импульса излучения (рис. 2, б). На основании параметров интерференционных колец, а также данных гетеродинных измерений установлено, что при энергии выходных импульсов 60—65 мДж спектральная ширина полосы генерации одномодового Nd:YAG-лазера < 57 МГц. При подаче импульсов одномодового излучения на вход ячейки ПГС на ее выходе регистрировались импульсы излучения с энергией ~ 25 —30 мДж ($\lambda = 1.57$ мкм), как и в случае многомодового задающего лазера с энергией входных импульсов 100 мДж.

При частоте следования световых импульсов 20 Гц задающий Nd:YAG-лазер второго типа на базе квантрона с “жесткой вклейкой” АЭ в сапфировую трубку (использован оптический клей с более высокой механической жесткостью и концентрацией рассеивающих частиц) генерировал стабильно в одномодовом режиме без привнесения в резонатор дополнительной фазовой пластинки. Максимальные энергии импульсов составляли 60—65 мДж от импульса к импульсу. Когда выходной пучок задающего лазера второго типа подавался на вход ячейки ПГС, на ее выходе регистрировались импульсы с энергией до 25—30 мДж.

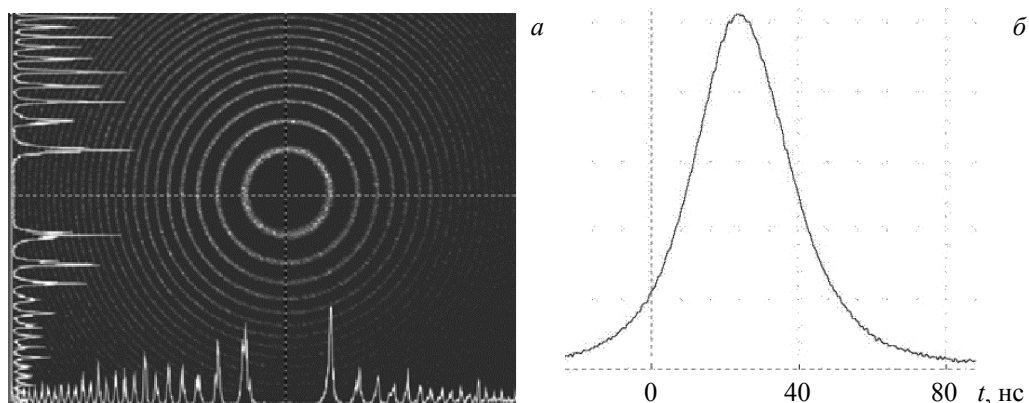


Рис. 2. Интерферограмма (а) и осциллограмма (б) импульса Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности в одномодовом режиме генерации

На втором этапе экспериментов частоты следования световых импульсов составляли 1—2 Гц. Лазеры и первого и второго типов при указанных частотах генерировали только в моноимпульсном многомодовом режиме с энергией выходных импульсов 100 мДж. В моноимпульсный одномодовый режим лазеры переключались только при установке в резонаторе дополнительно четвертьволновой фазовой пластины 12 (рис. 1). Энергия одномодовых импульсов при этом составила 60—65 мДж. При подаче одномодовых импульсов задающего лазера на вход ячейки ПГС на ее выходе формировались импульсы излучения на $\lambda = 1.57$ мкм с энергией 25—30 мДж.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе экспериментов задающие Nd:YAG-лазеры первого и второго типов изучались при частоте следования возбуждающих импульсов 20 Гц. Как свидетельствуют результаты [13], при сборке лазерных квантронов в объем АЭ с “мягкой вклейкой” не вносятся значительных механических напряжений. В объеме АЭ формируется тепловая линза с фокусным расстоянием ~4—5 м (частично компенсируется телескопом), однако в объеме АЭ не возникают явно выраженные области термонаведенного двулучепреломления [13, 14]. Лазерные моды конкурируют только в ходе процесса “естественной селекции”. Вследствие того что в Nd:YAG-активной среде длительности данного процесса не достаточно для эффективного выделения одной или небольшого числа интенсивных мод, задающий лазер по окончании переходного периода генерирует многомодовые импульсы в моноимпульсном режиме с энергией до 100 мДж (длительность импульсов до 9 нс), которые преобразуются в ячейке ПГС в импульсы с $\lambda = 1.57$ мкм и энергией до 30 мДж. Когда в резонатор задающего Nd:YAG-лазера первого типа вносится фазовая пластина, она в сочетании с поляризатором 6 образует интерференционно-поляризационный фильтр Лию [10], обеспечивающий дополнительную частотную селекцию [9]. Задающий лазер переключается в моноимпульсный одномодовый режим. Установка фазовой пластины сопровождается ростом оптических потерь, поэтому энергия одномодовых импульсов уменьшается до 60—65 мДж. Тем не менее одномодовые импульсы задающего лазера более эффективно преобразуются ячейкой ПГС в импульсы излучения с $\lambda = 1.57$ мкм, что позволяет получать на выходе ПГС импульсы с такой же энергией (30 мДж), как и при работе с моноимпульсным многомодовым лазером.

При частоте следования импульсов возбуждения 20 Гц в объеме “жестко закрепленного” АЭ лазера второго типа уже на пороге генерации формируются области термонаведенного двулучепреломления. АЭ начинает играть роль фазовой пластины, которая образует с поляризатором 6 фильтр Лию, происходит сужение спектра излучения путем дискриминации продольных мод. Лазер генерирует в моноимпульсном одномодовом режиме. Под воздействием внесенных потерь энергия задающего Nd:YAG-лазера падает до 60—65 мДж, но вследствие более высокой эффективности преобразования одномодового излучения энергия импульсов на выходе параметрического генератора света составляет 30 мДж.

Когда частота следования импульсов устанавливается равной 1—2 Гц (второй этап экспериментов), перегрев объема АЭ невелик (по нашим оценкам, не более нескольких градусов Цельсия) и заметного двулучепреломления не появляется даже в объеме АЭ с “жесткой вклейкой”. Как следствие, фильтр Лию не формируется и не включается процесс дополнительной селекции частот. Задающие Nd:YAG-лазеры и первого и второго типов генерируют в моноимпульсном многомодовом режиме. Переключение в моноимпульсный одномодовый режим происходит только при включении в состав лазерных резонаторов четвертьволновых фазовых пластин. Моноимпульсные одномодовые лазеры излучают импульсы с энергией 60—65 мДж, которые преобразуются в ячейке ПГС в импульсы излучения на $\lambda = 1.57$ мкм с энергией 25—30 мДж.

Закключение. Исследованы режимы работы оптической системы, включающей в себя компактный импульсный задающий диодно-накачиваемый Nd:YAG-лазер с пассивной модуляцией добротности и трехкристальную кольцевую ячейку параметрического генератора света. Показано, что частотно-селективные свойства пассивного модулятора добротности в режиме “естественной селекции мод” могут быть усилены путем формирования в резонаторе интерференционно-поляризационного фильтра Лию с фазовой пластиной в виде лазерного активного элемента с термонаведенным двулучепреломлением. Такого рода фильтр Лию создается при использовании квантрона с “жесткой вклейкой” активного элемента, работающего при относительно высоких энергии и частоте повторения импульсов излучения (60—100 мДж, 20 Гц). Совместное действие процесса “естественной селекции мод” и фильтра Лию обеспечивает устойчивое функционирование Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности в режиме одномодовой генерации (ширина полосы генерации <57 МГц).

Формирование фильтра Лио с “фазовой пластиной” в виде участка среды активного элемента с наведенным двулучепреломлением ранее наблюдалось и при исследовании процесса установления одномодового режима генерации в лазерах на основе иттербий-эрбиевого стекла с пассивной модуляцией добротности [13].

Применение одномодового импульсного лазера с пассивной модуляцией добротности ($\lambda = 1.06$ мкм) в качестве источника излучения для параметрического генератора света позволяет более чем в 1.5 раза уменьшить энергию задающих импульсов при сохранении заданного уровня энергии импульсов (30 мДж, $\lambda = 1.57$ мкм) на выходе ячейки параметрического генератора света. Дополнительное повышение эффективности преобразования достигается также введением в состав резонатора задающего лазера двухлинзового $1.3\times$ телескопа.

Уменьшение энергии импульсов задающего Nd:YAG-лазера при прочих равных условиях позволяет повысить степень компактности и общую надежность работы оптической системы, генерирующей импульсы излучения в условно безопасном для органов зрения спектральном диапазоне.

- [1] М. Н. Скворцов, М. В. Охапкин, А. Ю. Невский, С. Н. Багаев. Квант. электрон., **34** (2004) 1101—1106
- [2] D. R. Cremons, J. B. Abshire, X. Sun, G. Allan, H. Riris, M. D. Smith, S. Guzewich, A. Yu, F. Novis. CEAS Space J., **12** (2020) 149—162
- [3] O. Reitebuch, Ch. Lemmerz, E. Nagel, U. Paffrath, Y. Durand, M. Endemann, F. Fabre, M. Chaloupy. J. Atm. Ocean Technol., **26** (2009) 2501—2515
- [4] M. V. Bogdanovich, V. V. Kabanov, G. I. Ryabtsev, A. G. Ryabtsev, Y. V. Lebiadok. Proc. SPIE, **8677** (2013) 86770(1—6)
- [5] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, М. А. Щемелев, В. С. Титовец, Л. Агравал, А. Бхардваш. Квант. электрон., **47** (2017) 308—312
- [6] Р. Фишер, Л. А. Кулевский. Квант. электрон., **4** (1977) 245—289
- [7] W. R. Sooy. Appl. Phys. Lett., **7** (1965) 36—37
- [8] М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, П. В. Шпак, Л. Л. Тепляшин, М. А. Щемелев, П. И. Садовский. Журн. прикл. спектр., **86** (2019) 58—65 [M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. S. Kalinov, O. E. Kostik, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, L. L. Teplyashin, M. A. Shchemelev, P. I. Sadovskii. J. Appl. Spectr., **86** (2019) 50—55]
- [9] Е. О. Батура, М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. Н. Дудиков, К. И. Ланцов, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, П. В. Шпак, Л. Л. Тепляшин, М. А. Щемелев. Журн. прикл. спектр., **88** (2021) 57—64 [E. O. Batura, M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. N. Dudikov, K. I. Lantsov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, L. L. Teplyashin, M. A. Shchemelev. J. Appl. Spectr., **88** (2021) 48—54]
- [10] W. Demtroder. Laser Spectroscopy. Basic Concepts and Instrumentation/Sec. Corrected Printing, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag (1982)
- [11] Ф. Феру, Л. Мак-Крамб. Фотоника, **3** (2007) 34—40
- [12] T. V. Bezyazychnaya, M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. V. Kabanov, O. E. Kostik, Y. V. Lebiadok, K. V. Lepchenkov, V. V. Mashko, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, M. A. Shchemelev, L. L. Teplyashin. Opt. Commun., **308** (2013) 26—29
- [13] M. V. Bogdanovich, V. N. Dudikov, K. I. Lantsov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, L. L. Teplyashin, V. S. Tsitavets, P. V. Shpak, M. A. Shchemelev. Opt. Commun., **3464** (2020) art. 125533
- [14] А. В. Мезенов, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов. Термооптика твердотельных лазеров, Ленинград, Машиностроение (1986)