

ОДНОЧАСТОТНЫЙ МОНОИМПУЛЬСНЫЙ YAG:Nd-ЛАЗЕР С КОЛЬЦЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ И ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

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

УДК 535.37+621.371.378

Институт физики НАН Беларуси,
220072, Минск, просп. Независимости, 68-2, Беларусь; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

(Поступила 17 октября 2018)

Исследованы особенности формирования режима одночастотной однонаправленной моноимпульсной генерации в YAG:Nd-лазере с кольцевым трехзеркальным резонатором и поперечной диодной накачкой при инжекции в резонатор внешнего узкополосного оптического излучения. Экспериментально показано, что асимметрия расположения внутрирезонаторных элементов относительно выходного зеркала и деполаризационные эффекты в них приводят к различию в энергии и поляризации моноимпульса кольцевого YAG:Nd-лазера в зависимости от направления (по часовой или против часовой стрелки) ввода излучения инжекции. Наиболее заметно различие в выходных характеристиках одночастотного однонаправленного моноимпульса кольцевого YAG:Nd-лазера проявляется при переходе от активной модуляции добротности к пассивной.

Ключевые слова: твердотельный YAG:Nd-лазер с диодной накачкой, инжекция узкополосного излучения, одночастотный моноимпульсный режим генерации, кольцевой резонатор.

The formation features of the regime of single-frequency unidirectional monopulse lasing of Nd:YAG laser with a triple-mirror ring cavity and a side diode-pump under the condition of injection of external narrow-band optical radiation into the resonator are studied. It is experimentally shown that the asymmetrical layout of the intracavity elements relative to the laser output mirror and the depolarization effects in these elements lead to a difference in the energy and polarization of the monopulse Nd:YAG ring laser depending on the direction (clockwise or anticlockwise) of the input of the injected radiation. The difference in the output characteristics of the single-frequency unidirectional monopulse Nd:YAG ring laser is the most evident in the case of transition from the active to the passive Q-switching.

Keywords: LD pumped Nd:YAG solid-state laser, injection of narrow-band radiation, single frequency monopulse lasing mode, ring laser cavity.

Введение. Одночастотные импульсные лазеры относятся к наиболее востребованным источникам узкополосного излучения, разрабатываемым применительно к ветровым доплеровским системам [1—3] и лидарам дифференциального поглощения [4, 5]. Как показано в [6—8], относительно мощные световые импульсы с шириной спектральной полосы <100 МГц достаточно эффективно формируются методом инжекции внешнего затравочного узкополосного излучения в резонатор управляемого лазера, габариты и уровень энергопотребления которого значительно уменьшаются, если в качестве источника затравочного излучения применяется одночастотный полупроводниковый лазерный модуль [9].

SINGLE-FREQUENCY SIDE DIODE PUMPED Q-SWITCHED Nd:YAG-LASER WITH RING RESONATOR

M. V. Bogdanovich, A. V. Grigor'ev, V. S. Kalinoy, O. E. Kostik, K. I. Lantsov*, K. V. Lepchenkov, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, L. L. Tepyashin, M. A. Shchemelev (B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 68-2 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by)

При создании одночастотных импульсных лазеров с инъекцией затравочного излучения используются как линейные, так и кольцевые оптические схемы построения резонаторов [6—10]. Несмотря на более сложные схемные решения, кольцевые резонаторы обладают рядом важных преимуществ по сравнению с линейными. Так, в кольцевом резонаторе достаточно эффективно минимизируется обратное воздействие интенсивного импульса управляемого лазера на оптические элементы задающего (затравочного) лазера [11]. По этой причине лазеры с кольцевыми резонаторами все больше привлекают внимание разработчиков узкополосных лазерных систем.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей формирования режима одночастотной однонаправленной моноимпульсной генерации в YAG:Nd-лазере с кольцевым трехзеркальным резонатором и поперечной диодной накачкой при воздействии непрерывного внешнего оптического затравочного сигнала. Моноимпульсный режим генерации кольцевого YAG:Nd-лазера осуществлялся методами активной (электрооптический затвор) и пассивной (затвор на основе кристалла YAG:Cr) модуляции добротности. Особое внимание уделено оценке степени влияния асимметричного расположения внутрирезонаторных элементов относительно выходного зеркала и поляризационной анизотропии, наводимой в элементах резонатора, на процесс формирования выходного одночастотного однонаправленного лазерного пучка.

Методика измерений. Блок-схема исследуемой YAG:Nd-лазерной системы представлена на рис. 1. Основная составная часть схемы — трехзеркальный кольцевой моноимпульсный YAG:Nd-лазер, в резонатор которого инжектируется излучение одночастотного непрерывного лазера. Планарный резонатор кольцевого лазера длиной 72 см формировался тремя “плоскими” зеркалами М4—М6 (см. равнобедренный треугольник *ABC*). В качестве активного элемента (АЭ) 11 лазера использован кристалл YAG:Nd цилиндрической формы радиусом $R = 2.5$ мм и длиной $L = 50$ мм (ось цилиндра ориентирована вдоль кристаллографического направления [111]). Поперечная накачка АЭ осуществлялась тремя матрицами лазерных диодов (МЛД) с максимальной общей импульсной мощностью излучения до 4.2 кВт. В блоке накачки моноимпульсного YAG:Nd-лазера применен квантрон, в соответствии с конструкцией которого боковая поверхность АЭ окружена слоем оптического клеящего состава с рассеивающим порошком [12, 13]. МЛД расположены симметрично относительно оси цилиндрического АЭ. Квантрон данного типа позволяет увеличить энергетическую эффективность работы блока накачки и повысить степень однородности распределения интенсивности генерируемого излучения в поперечном сечении выходного пучка. Для подавления поперечных мод высших порядков в резонаторе помещались диафрагмы 9, 10. Активная модуляция добротности кольцевого лазерного излучателя осуществлялась с помощью ячейки Погкельса 14 на основе кристалла DKDP с полуволновым напряжением ~ 8 кВ. Ячейка Погкельса помещалась между двумя узкополосными диэлектрическими поляризаторами 12 и 13 с отношением пропускания для *s*- и *p*-компонент излучения $\sim 2000:1$. Поляризаторы ориентированы таким образом, что электрический вектор генерируемой волны перпендикулярен плоскости треугольника *ABC* (*s*-компонента). При реализации пассивной модуляции добротности кольцевого резонатора вместо ячейки Погкельса между поляризаторами 12, 13 установлен кристалл YAG:Cr с начальным пропусканием $\sim 80\%$. Пропускание “выходного” зеркала М4 $\approx 50\%$. Коэффициенты отражения зеркала М4 для *s*- и *p*-компонент падающего излучения измерялись с помощью спектрофотометра Photon RT (Essent Optics) применительно к заданным условиям эксперимента (см. табл. 1). Коэффициент отражения зеркал М5 и М6 составлял 99.8 % на длине волны генерации $\lambda = 1064$ нм.

Т а б л и ц а 1. Оптические характеристики выходного зеркала М4 исследуемого кольцевого лазера

Поляризация падающего излучения	Коэффициент отражения, %			
<i>s</i> -компонента	58.1	57.9	57.9	58.1
<i>p</i> -компонента	47.5	47.4	47.4	47.5

П р и м е ч а н и е. Представлены результаты четырех измерений на $\lambda = 1064$ нм, угол между падающим и отраженным лучами 60° ; среднее значение коэффициента отражения для *s*-компоненты 58.0 %, для *p*-компоненты 47.4 %.

В качестве источника излучения инъекции использован непрерывный одночастотный линейно поляризованный YAG:Nd-лазер 1 мощностью до 15 мВт с шириной линии генерации ≤ 1 МГц и расходимостью генерируемого пучка ≤ 2.3 мрад. Точная настройка на частоту собственной моды кольцевого резонатора моноимпульсного лазера достигалась варьированием частоты затравочного излучения в пределах 4 ГГц путем прецизионного перемещения выходного зеркала лазера-инжектора пьезокорректором (изменением длины резонатора лазера-инжектора). Фарадеевский изолятор 2 препятствует установлению обратной связи между лазером-инжектором и кольцевым моноимпульсным лазером, работающим в режиме двунаправленной генерации. Линзы L1 и L2 использованы для согласования пространственных характеристик выходного излучения лазера-инжектора и собственной моды кольцевого резонатора, сформированного тремя “плоскими” зеркалами M4—M6.

С помощью поворотных зеркал M1—M3 излучение лазера-инжектора вводилось в кольцевой резонатор моноимпульсного YAG:Nd-лазера через полупрозрачное зеркало M4. При использовании пары зеркал M1, M3 излучение инъекции вводилось в кольцевой резонатор в направлении распространения излучения генерации по часовой стрелке (канал 1), а при использовании пары зеркал M1, M2 — против часовой стрелки (канал 2). Вследствие потерь в каналах доставки излучения инъекции до выходного зеркала M4 (при прохождении фарадеевского изолятора, пластинки $\lambda/2$, линз L1, L2) непосредственно в резонатор кольцевого лазера вводилось излучение мощностью < 7 мВт. Так как плоскость колебаний электрического вектора излучения лазера-инжектора ортогональна плоскост-

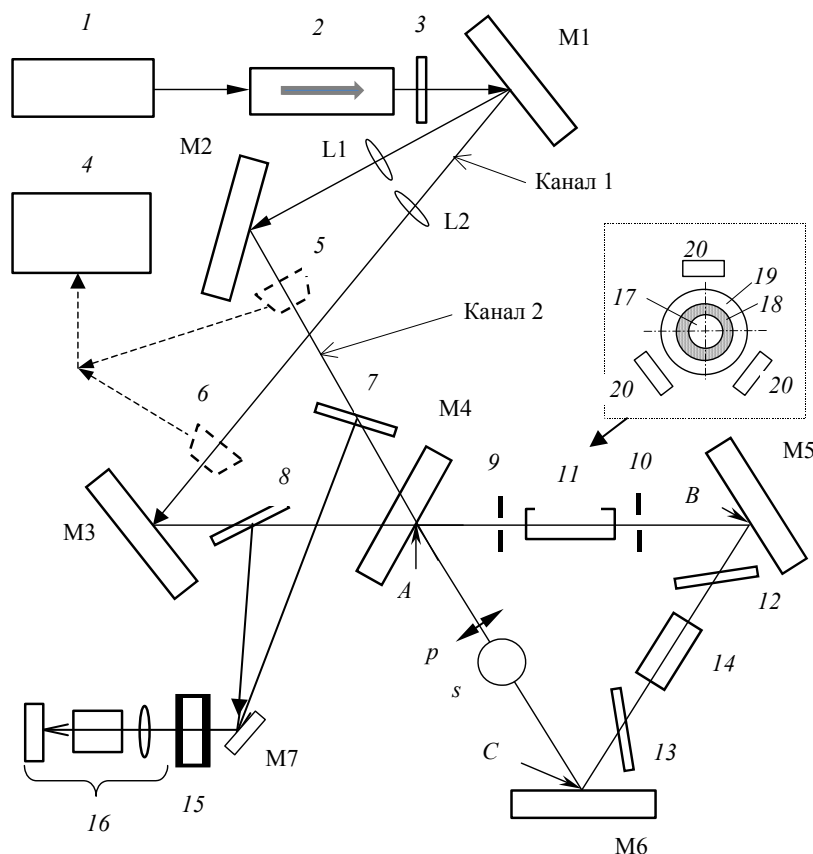


Рис. 1. Схема установки: 1 — YAG:Nd-лазер-инжектор; 2 — фарадеевский изолятор; 3 — пластинка $\lambda/2$; 4 — осциллограф; 5, 6 — фотодиоды; 7, 8 — светоделительные пластинки; 9, 10 — диафрагмы; 11 — квантрон с YAG:Nd-активным элементом; 12, 13 — поляризаторы; 14 — электрооптический (ячейка Погкельса) или пассивный (кристалл YAG:Cr) затвор; 15 — интерферометр Фабри—Перо; 16 — система фоторегистрации; p и s — возможные ориентации электрического вектора генерируемой волны кольцевого лазера относительно плоскости треугольника ABC; на вставке — положение АЭ 17 с рассеивающим слоем 18 внутри сапфировой трубки 19 относительно матриц лазерных диодов 20 в квантроне 11

ти кольцевого резонатора (s -компонента), оптические потери на поляризаторах 12 , 13 и электрооптическом затворе 14 минимальны. Поэтому в обоих вариантах подачи затравочного сигнала (по каналу 1 или 2) в объем АЭ через его просветленные торцы доставлялось затравочное излучение приблизительно одинаковой мощности.

Контроль режимов генерации (многомодовый двунаправленный или одночастотный однонаправленный) кольцевого моноимпульсного YAG:Nd-лазера осуществляется двумя методами. В соответствии с первым методом анализируется временной профиль импульса излучения лазера, регистрируемый с помощью быстродействующих фотодиодов 5 , 6 и осциллографа 4 . В случае двунаправленной многочастотной генерации на временном профиле моноимпульса излучения наблюдается типичная ярко выраженная структура (рис. 2, кривая 1). При однонаправленной одночастотной генерации временной профиль регистрируемого моноимпульса имеет гладкую форму (рис. 2, кривые 2 , 3). Во втором методе с помощью интерферометра Фабри—Перо 15 и системы фоторегистрации 16 анализируется спектр моноимпульса излучения кольцевого лазера. Примеры интерферограмм Фабри—Перо, регистрируемых в процессе генерации моноимпульса излучения кольцевого лазера, показаны на рис. 3. В режиме двунаправленной многочастотной генерации ширина спектра моноимпульса излучения кольцевого лазера намного превышает область свободной дисперсии интерферометра Фабри—Перо, поэтому внутренняя структура спектра не проявляется (рис. 3, a). При реализации однонаправленной одночастотной генерации интерферограмма Фабри—Перо выходного излучения кольцевого лазера имеет характерную для узкополосного излучения кольцевую структуру, как показано на рис. 3, b . Точная ширина спектра однонаправленной одночастотной генерации может быть определена гетеродинным способом, так как ширина ее спектра <100 МГц.

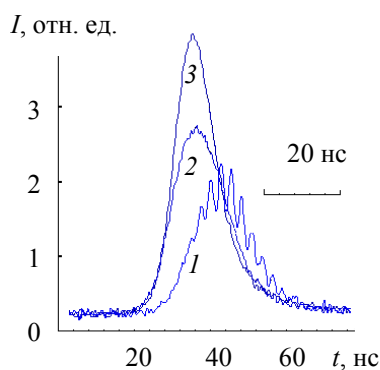


Рис. 2. Осциллограммы импульсов генерации трехзеркального кольцевого моноимпульсного YAG:Nd-лазера: 1 — двунаправленный многочастотный режим генерации; $2, 3$ — однонаправленные одночастотные режимы генерации

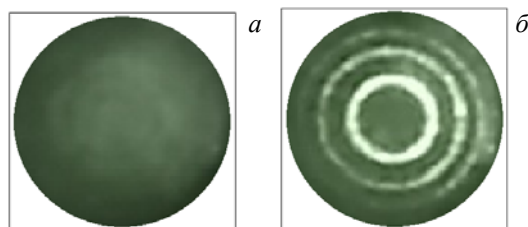


Рис. 3. Интерферограммы Фабри—Перо выходного излучения трехзеркального кольцевого моноимпульсного YAG:Nd-лазера: a — режим двунаправленной многочастотной генерации; b — режим однонаправленной одночастотной генерации

Энергия выходного моноимпульса излучения кольцевого лазера в направлении навстречу излучению инжекции контролировалась по его отражению от первого со стороны лазера-инжектора поляризатора изолятора Фарадея (на рис. 1 не показан).

Эксперимент. Режим свободной генерации. В режиме свободной генерации (электрооптический затвор выключен) кольцевой YAG:Nd-лазер генерирует излучение в обоих направлениях кольцевого резонатора. При этом энергия импульсов излучения, распространяющихся внутри кольцевого резонатора в направлении против часовой стрелки, $E_{ac} = 15.1$ мДж (частота повторения импульсов 5 Гц, длительность импульсов по полувысоте ~ 180 мкс) превышает энергию импульсов, распространяющихся по часовой стрелке E_c , на $\sim 25\%$ ($E_c = 11.9$ мДж).

Активная модуляция добротности. В моноимпульсном режиме генерации (электрооптический затвор включен) без излучения инжекции внутри резонатора кольцевого лазера разность между энергиями моноимпульсов, распространяющихся против часовой и по часовой стрелке, становится еще более заметной — $E_{ac} = 14.3$ мДж, $E_c = 9.5$ мДж, частота повторения импульсов 5 Гц, длительность импульсов по полувысоте ~ 13.6 нс.

При вводе в резонатор кольцевого лазера излучения инжекции по каналу 1 и настройке частоты его излучения на частоту собственной моды кольцевого резонатора при мощности излучения инжекции >3 мВт в кольцевом лазере устанавливается одночастотный однонаправленный по часовой стрелке моноимпульсный режим генерации с энергией импульсов $E_c = 17$ мДж. Излучение на выходе кольцевого лазера линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости треугольника ABC (плоскость s -компоненты).

Если излучение инжекции вводится в резонатор кольцевого лазера по каналу 2, то одночастотная однонаправленная моноимпульсная генерация осуществляется в направлении против часовой стрелки при большей мощности излучения инжекции (>6 мВт) по сравнению с вариантом ввода излучения инжекции по каналу 1 (3 мВт). В данном случае энергия моноимпульса возрастает до $E_{ac} = 22$ мДж, что на $\sim 30\%$ выше, чем в случае генерации излучения в направлении по часовой стрелке. Излучение на выходе эллиптически поляризовано. Большая ось эллипса наклонена на угол 2° относительно плоскости колебаний s -компоненты генерируемого излучения. Отношение длин большой и малой осей эллипса 16.

Пассивная модуляция добротности. При работе в режиме пассивной модуляции добротности ячейка Поккельса 14 удалялась из резонатора, а между поляризаторами 12, 13 (рис. 1) помещался кристалл YAG:Cr. В моноимпульсном режиме генерации без излучения инжекции внутри резонатора кольцевого лазера энергии моноимпульсов выходного излучения, распространяющегося против и по часовой стрелке, $E_{ac} = 22$ мДж и $E_c = 9$ мДж.

При вводе в резонатор кольцевого лазера излучения инжекции по каналу 1 и настройке частоты его излучения на частоту собственной моды кольцевого резонатора при мощности излучения инжекции >4 мВт в кольцевом лазере устанавливается одночастотный однонаправленный по часовой стрелке моноимпульсный режим генерации с энергией импульсов $E_c = 24$ мДж.

В случае ввода излучения инжекции в резонатор кольцевого лазера по каналу 2 одночастотная однонаправленная моноимпульсная генерация не регистрируется даже при оптимальной настройке частоты излучения лазера-инжектора на частоту собственной моды кольцевого резонатора и максимально возможной мощности излучения инжекции 7 мВт, т. е. наблюдается многочастотная двунаправленная моноимпульсная генерация.

Результаты и их обсуждение. Полученные экспериментальные результаты можно объяснить, если учесть несимметричное расположение оптических элементов кольцевого резонатора относительно выходного зеркала M4 и эффекты деполяризации генерируемого излучения в элементах резонатора, которые проявляются в режиме модулированной добротности как с инжекцией, так и без инжекции внешнего лазерного излучения. (Так как основная цель работы — получение в кольцевом лазере одночастотной однонаправленной моноимпульсной генерации, режим свободной генерации не исследовался.)

Активная модуляция добротности (электрооптический затвор в открытом состоянии). При организации инжекции по каналу 1 генерируемый в резонаторе кольцевого лазера по часовой стрелке одночастотный однонаправленный лазерный моноимпульс отражается от зеркала M5 и после прохождения через поляризатор 12, электрооптический затвор 14 и поляризатор 13 падает на выходное зеркало M4 в точке A (рис. 1). В данном варианте инжекции генерируемое излучение приходит к выходному зеркалу M4 линейно поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости треугольника ABC (s -компонента). После отражения от поверхности M4 (коэффициент отражения 58.0%, табл. 1) в точке A под углом 30° генерируемый пучок после прохождения диафрагмы 9 вновь попада-

ет в объем АЭ. Часть генерируемого излучения проходит через полупрозрачное зеркало М4 и формирует линейно поляризованное (в плоскости s -компоненты) выходное излучение кольцевого лазера.

Когда для доставки излучения инжекции используется канал 2, излучение затравочного лазера отражается от зеркала М6 в направлении против часовой стрелки, проходит через поляризатор 13, электрооптический затвор 14 и поляризатор 12. После отражения от поверхности зеркала М5 линейно поляризованное в плоскости s -компоненты излучение инжекции падает на торец YAG:Nd-АЭ. После захвата затравочного излучения формируется мощный поток одночастотной однонаправленной (против часовой стрелки) моноимпульсной генерации. Данный линейно поляризованный лазерный моноимпульс в процессе прохождения вдоль оси АЭ частично деполаризуется под воздействием эффектов, обусловленных термически наведенным двулучепреломлением.

Количественно степень термически наведенной деполаризации можно оценить по отношению A_{ps} интенсивностей p - и s -компонент излучения, усредненному по площади поперечного сечения АЭ [14, 15]:

$$A_{ps} = \frac{4}{\pi} \int_0^{1+\pi/4} \int_{-\pi/4}^{\pi/4} [a_{ps}(\xi, \varphi) \xi] d\xi d\varphi, \quad (1)$$

где φ — азимутальный угол радиус-вектора r в плоскости сечения АЭ (полярная система координат), $\xi = r/R$, $a_{ps}(\xi, \varphi) \equiv |E_p|^2/|E_s|^2 = \sin^2 2\varphi \sin^2[\delta(r)/2]$, $\delta(r) = (2\pi/\lambda)LQ\Delta T\xi^2$. Для цилиндрического АЭ в виде YAG:Nd-кристалла, ось которого ориентирована вдоль кристаллографического направления [111], $Q = 17 \cdot 10^{-7}$ [12]. Параметр ΔT задает температурный градиент вдоль радиус-вектора r в поперечном сечении АЭ. В стационарном приближении $\Delta T = T(0) - T(R) = P_a/4\pi k_T L$, где $T(0)$ и $T(R)$ — температуры в центре и на боковой поверхности АЭ, P_a — энергия излучения накачки, рассеянная в объеме АЭ, $k_T = 14$ Вт/м · К — коэффициент теплопроводности кристалла YAG:Nd [16].

Для используемого лазерного квантрона при максимальной общей импульсной мощности излучения трех МЛД 4.2 кВт и частоте следования импульсов накачки 5 Гц имеем $\Delta T = 0.5$ К. (При нахождении ΔT учитывалось, что в объеме АЭ в виде тепла рассеивается ~80 % энергии излучения накачки, подводимой к АЭ, а также тот факт, что в условиях поперечной накачки МЛД типа СЛМ-3 наиболее эффективно прокачивается центральная часть АЭ вдоль оси резонатора длиной 25 мм.) Для $\Delta T = 0.5$ К рассчитанное по формуле (1) отношение $A_{ps} \approx 0.003$. Это означает, что линейно поляризованное (в плоскости, перпендикулярной плоскости треугольника ABC) генерируемое излучение за один проход по объему АЭ преобразуется в излучение, характеризующееся двумя поляризационными компонентами — s (99.7 %) и p (0.3 %). Вследствие того что коэффициенты отражения зеркала М4 различны для s - и p -компонент (табл. 1), оптические потери для излучения, распространяющегося в направлении против часовой стрелки, отличаются от потерь для излучения, распространяющегося в обратном направлении. Это различие возникает из-за того, что после прохождения АЭ излучение, распространяющееся в направлении против часовой стрелки, падает на зеркало М4 эллиптически поляризованным, в то время как излучение, распространяющееся в обратном направлении (по часовой стрелке), падает на М4 линейно поляризованным в виде s -компоненты. На выходе кольцевого лазера регистрируется энергия обеих поляризационных компонент. Отраженная от зеркала М4 p -компонента при дальнейшем распространении в направлении против часовой стрелки подавляется поляризатором 13, в то время как s -компонента проходит через элементы электрооптического затвора 12, 13, 14 и после отражения от зеркала М5 вновь попадает в объем АЭ.

Пассивная модуляция добротности. В случае реализации режима пассивной модуляции добротности без излучения инжекции внутри резонатора кольцевого лазера превышение энергии излучения, распространяющегося против часовой стрелки, над энергией излучения, распространяющегося по часовой стрелке, можно объяснить деполаризацией генерируемого излучения в объеме АЭ, как и в случае работы лазера с активной модуляцией добротности.

При вводе излучения инжекции по каналу 1 оно постоянно воздействует на активную среду. Вследствие этого в момент просветления пассивного затвора интенсивность излучения инжекции на одной из собственных мод кольцевого резонатора превышает интенсивность излучения на всех других модах, что приводит к возникновению одночастотной однонаправленной (по часовой стрелке) моноимпульсной генерации.

При организации инъекции по каналу 2 инжектируемое излучение начинает воздействовать на АЭ только после просветления пассивного затвора. Можно предположить, что мощность инжектируемого излучения ~7 мВт (максимальная в наших экспериментах) недостаточна для инициирования процесса формирования одночастотной однонаправленной (против часовой стрелки) моноимпульсной генерации в условиях конкуренции с широкополосным излучением суперлюминесценции.

Заключение. Исследованы особенности формирования режима одночастотной моноимпульсной генерации в YAG:Nd-лазере с кольцевым трехзеркальным резонатором и поперечной диодной накачкой при инъекции в резонатор внешнего узкополосного оптического излучения. Экспериментально показано, что асимметрия расположения внутрирезонаторных элементов относительно выходного зеркала и деполаризационные эффекты в этих элементах приводят к различиям в энергии и поляризации моноимпульса кольцевого YAG:Nd-лазера в зависимости от направления (по часовой или против часовой стрелки) ввода внешнего излучения инъекции. В частности, в режиме активной модуляции добротности при инъекции внешнего узкополосного оптического сигнала энергия одночастотных однонаправленных моноимпульсов, распространяющихся внутри резонатора исследуемого кольцевого лазера в направлении против часовой стрелки, превышает энергию импульсов, распространяющихся по часовой стрелке, на ~25 %.

В моноимпульсном режиме генерации в условиях активной модуляции добротности без излучения инъекции внутри резонатора кольцевого лазера разность между энергиями моноимпульсов, распространяющихся против часовой стрелки и по часовой стрелке, возрастала до 50 %. Выходное излучение кольцевого лазера в случае генерации одночастотного однонаправленного по часовой стрелке моноимпульса линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости треугольника ABC (*s*-компонента). При генерации одночастотной однонаправленной моноимпульсной генерации в направлении против часовой стрелки излучение на выходе становилось эллиптически поляризованным, при этом большая ось эллипса наклонена на угол 2° относительно плоскости колебаний *s*-компоненты генерируемого излучения.

Наиболее заметно различие в выходных характеристиках моноимпульса кольцевого YAG:Nd-лазера проявляется при использовании пассивного затвора. В данном случае одночастотный однонаправленный моноимпульсный режим устанавливается только при вводе в резонатор кольцевого лазера излучения инъекции по часовой стрелке, т. е. по каналу 1. При вводе излучения инъекции в резонатор кольцевого лазера по каналу 2 одночастотная однонаправленная моноимпульсная генерация не регистрируется даже при оптимальной настройке частоты излучения лазера-инжектора на частоту собственной моды кольцевого резонатора и максимально возможной мощности излучения инъекции 7 мВт, т. е. наблюдается многочастотная двунаправленная моноимпульсная генерация.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании мощных компактных одночастотных источников лазерного излучения для ветровых доплеровских систем и лидаров дифференциального поглощения.

- [1] Б. С. Ринкевичюс, А. В. Толкачев. Квант. электрон., **9** (1974) 1917—1922
- [2] В. Е. Зуев, В. В. Зуев. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы, С.-Петербург, Гидрометеиздат (1992)
- [3] O. Reitebuch, Ch. Lemmerz, E. Nagel, U. Paffrath. J. Atm. Ocean Technol., **26** (2009) 2501—2515
- [4] U. Platt, J. Stutz. Differential Optical Absorption Spectroscopy, Springer—Verlag (2008)
- [5] U. Platt, J. Meinen, D. Pöhler, T. Leisner. Atm. Measur. Technol., **2** (2009) 713—723
- [6] И. Г. Зубарев, С. И. Михайлов. Квант. электрон., **3** (1974) 625—628
- [7] А. Н. Бондаренко, К. Г. Фолин, В. А. Смирнов, В. В. Анциферов. Письма в ЖЭТФ, **6** (1967) 692—695
- [8] В. В. Анциферов. ЖТФ, **68** (1998) 74—79
- [9] М. В. Богданович, В. П. Дураев, В. С. Калинов, О. Е. Костик, К. И. Ланцов, К. В. Лепченков, В. В. Машко, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, Л. Л. Тепляшин. Журн. прикл. спект., **83** (2016) 211—215
[M. V. Bogdanovich, V. S. Kalinov, O. E. Kostik, K. I. Lantsov, K. V. Lepchenkov, V. V. Mashko, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, L. L. Teplyashin. J. Appl. Spectr., **83** (2016) 194—197]
- [10] E. A. P. Cheng, T. J. Kane. Opt. Lett., **16** (1991) 478—480

-
- [11] **В. В. Анциферов, Н. М. Держи, А. С. Кучьянов, В. С. Пивцов, В. Д. Угожаев, К. Г. Фолин.** Квант. электрон., **2** (1975) 57—60
- [12] **А. В. Мезенов, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов.** Термооптика твердотельных лазеров, Ленинград, Машиностроение (1986)
- [13] **Т. В. Безъязычная, М. В. Богданович, А. В. Григорьев, В. В. Кабанов, О. Е. Костик, Е. В. Лебедок, В. В. Машко, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, Л. Л. Тепляшин, М. А. Щемелев.** Моноимпульсный Nd:YAG лазер с поперечной диодной накачкой, патент РФ № 8850, приоритет от 17.09.2012
- [14] **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
- [15] **А. А. Мак, Л. Н. Сомс, В. А. Фромзель, В. Е. Яшин.** Лазеры на неодимовом стекле, Москва, Наука (1990)
- [16] **W. Koechner.** Solid-State Laser Engineering, 4th ed., Springer—Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1995)