

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 535:621.373.8; 535:621.375.8

## ТИТАН-САПФИРОВЫЙ ЛАЗЕР, НАКАЧИВАЕМЫЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

© 2009 г. Г. И. Рябцев\*, доктор физ.-мат. наук; М. В. Богданович\*; А. И. Енжиевский\*;  
Л. Л. Тепляшин\*, канд. физ.-мат. наук; А. Г. Рябцев\*\*, М. А. Щемелев\*\*;  
А. В. Пожидаев\*\*, Н. В. Кондратюк\*\*\*, канд. физ.-мат. наук

\* Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Белоруссии, Минск, Белоруссия

\*\* Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

\*\*\* Белорусский Национальный технический университет, Минск, Белоруссия

E-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

Создан компактный перестраиваемый источник лазерного излучения на основе кристалла  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  с энергией в импульсе до 85 мкДж, длительностью 5 нс и параметром  $M^2$  порядка 1,1, накачиваемый излучением второй гармоники неодимового лазера с продольной диодной накачкой. Для преобразования излучения неодимового лазера во вторую гармонику использовался кристалл КТР с эффективностью преобразования 58%. Внешний дифференциальный квантовый выход титан-сапфирового лазера по отношению к излучению второй гармоники составил 41%.

Коды OCIS: 140.3480, 140.3530, 140.3590.

Поступила в редакцию 01.07.2008.

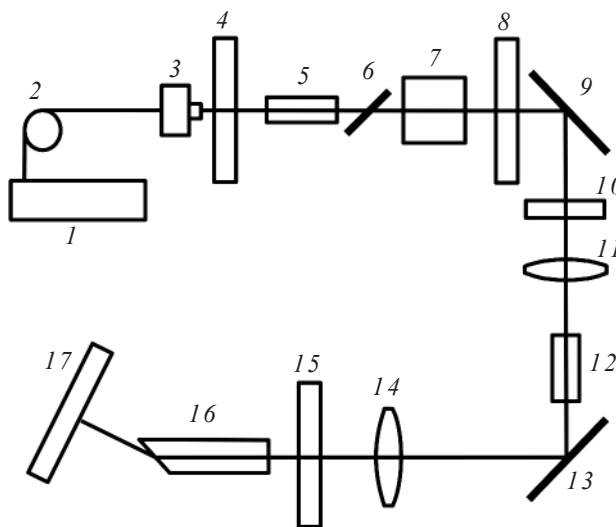
### Введение

Лазерные источники излучения на основе кристалла титан-сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ ), с перестраиваемой длиной волны генерации в диапазоне 650–1100 нм, широко применяются в лидарных системах и спектроскопии [1, 2]. Значительного повышения эффективности при снижении габаритов титан-сапфирового лазера (ТСЛ) удалось достичь путем применения блоков диодной накачки для задающих неодимовых лазеров (ЗНЛ) [3]. По имеющимся литературным данным созданы компактные ТСЛ с энергией выходного импульса до 720 мкДж при поперечной [4] и 1,3 мкДж и при продольной [5] диодной накачке ЗНЛ.

Настоящая статья посвящена разработке эффективного титан-сапфирового лазера, накачиваемого излучением второй гармоники неодимового лазера с продольной диодной накачкой, а также исследованию его энергетических, временных, спектральных и пространственных характеристик.

### Эксперимент и моделирование титан-сапфирового лазера

Схема титан-сапфирового лазера представлена на рис. 1. ТСЛ включает ЗНЛ с продольной диодной накачкой, удвоитель частоты на кристалле КТР и перестраиваемый лазер на кристалле  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ .



**Рис. 1.** Схема титан-сапфирового лазера, накачиваемого излучением второй гармоники неодимового лазера с диодной накачкой. 1 – лазерная диодная сборка, 2 – оптическое волокно, 3 – фокусирующая система, 4 – глухое зеркало неодимового лазера, 5 – АЭ неодимового лазера, 6 – поляризатор, 7 – ячейка Поккельса, 8 – выходное зеркало неодимового лазера, 9 – поворотная пластинка, 10 – кварцевый ротатор плоскости поляризации, 11 – линза, 12 – кристалл КТР, 13 – поворотная пластинка, 14 – линза, 15 – глухое зеркало  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера, 16 – активный элемент  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ , 17 – выходное зеркало  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера.

**Задающий неодимовый лазер.** В настоящей работе проводились исследования генерационных характеристик ЗНЛ на основе ортованадата иттрия ( $YVO_4:Nd^{3+}$ ) и алюмоиттриевого граната ( $YAG:Nd^{3+}$ ) с продольной диодной накачкой в режиме модулированной добротности. Концентрация ионов неодима в  $YVO_4:Nd^{3+}$  и  $YAG:Nd^{3+}$  составляла 0,4 и 0,8 ат.% соответственно. Активный элемент (АЭ) на основе  $YVO_4:Nd^{3+}$  представлял собой параллелепипед  $4 \times 4 \times 8$  мм с просветленными торцами для излучения накачки с длиной волны  $\lambda = 808$  нм и генерации с  $\lambda = 1064$  нм. АЭ на основе  $YAG:Nd^{3+}$  был выполнен в виде стержня диаметром 4 мм и длиной 7 мм. На один из торцов  $YAG:Nd^{3+}$  наносилось диэлектрическое покрытие с максимумом пропускания на длине волны излучения накачки (808 нм) и максимумом отражения для длины волны генерации (1064 нм), на второй торец  $YAG:Nd^{3+}$  наносилось просветляющее покрытие для длины волны генерации.

Для накачки АЭ использовалась лазерная диодная сборка (ЛДС) 1 с длиной волны излучения 808 нм и выводом излучения через оптическое волокно 2 (диаметр сердцевины 400 мкм). ЛДС генерировала импульсы мощностью около 20 Вт в импульсе, длительностью порядка 1 мс и частотой следования импульсов до 100 Гц. Подстройка длины волны излучения ЛДС под полосу поглощения АЭ осуществлялась изменением температуры ЛДС. Для пространственного согласования пучка накачки с основной модой резонатора неодимового лазера использовалась фокусирующая система 3, которая позволяла формировать пучок накачки с диаметром в перетяжке 950 мкм в случае применения  $YVO_4:Nd^{3+}$  и 600 мкм при использовании  $YAG:Nd^{3+}$ .

Резонатор ЗНЛ длиной 100 мм образовывался глухим зеркалом 4 с максимальным пропусканием для накачки и максимальным отражением для генерации и полупрозрачным плоским выходным 8 зеркалом с коэффициентом отражения порядка 50% на длине волны 1064 нм. Для модуляции добротности использовался электрооптический затвор, содержащий поляризатор 6 и ячейку Поккельса 7.

При мощности излучения накачки, равной 20 Вт в импульсе, максимальные значения энергии импульса выходного излучения составляли около 470 мкДж и около 600 мкДж при использовании кристаллов  $YVO_4:Nd^{3+}$  и  $YAG:Nd^{3+}$  соответственно. Меньшее значение энергии импульса излучения при использовании  $YVO_4:Nd^{3+}$ , по-видимому, обусловлено более коротким временем жизни возбужденного состояния  $\tau \approx 90$  мкс и большим значением сечения стимулированных переходов испускания  $\sigma \approx 25 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup> по сравнению с  $YAG:Nd^{3+}$  ( $\tau \approx 230$  мкс,  $\sigma \approx 2,8 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup>). В случае относительно больших значений сечения

стимулированных переходов происходит существенный сьем аккумулированной в среде энергии под воздействием усиленной люминесценции [6]. Следует также отметить, что длительность импульса излучения накачки в наших экспериментах значительно превышала время жизни возбужденного состояния ионов неодима для обоих кристаллов. Предполагается, что эффективность генерации ЗНЛ можно повысить путем сокращения длительности импульса накачки примерно до 90 мкс при использовании  $YVO_4:Nd^{3+}$  и до 230 мкс для  $YAG:Nd^{3+}$  [7].

Установлено, что при плотности накачки приблизительно 2,8 кВт/см<sup>2</sup> в АЭ из  $YVO_4:Nd^{3+}$  происходит сильная деполяризация излучения, обусловленная наведенным в кристалле  $YVO_4:Nd^{3+}$  двулучепреломлением [8]. Для снижения степени деполяризации диаметр пучка накачки был увеличен примерно до 950 мкм. В кристалле  $YAG:Nd^{3+}$  данный эффект не наблюдался, и поэтому он возбуждался пучком накачки с меньшим диаметром около 600 мкм.

В дальнейших экспериментах использовался  $YAG:Nd^{3+}$ -лазер, который генерировал импульсы с энергией до 600 мкДж и длительностью импульсов 5 нс.

**Удвоитель частоты.** Для преобразования излучения  $YAG:Nd^{3+}$ -лазера во вторую гармонику использовался кристалл КТР 12 размером  $3 \times 3 \times 7$  мм, вырезанный в направлении  $\theta = 90^\circ$  и  $\phi = 23^\circ$  для фазового синхронизма типа *II eoe*. Для поворота плоскости поляризации излучения ЗНЛ на  $45^\circ$  относительно кристаллофизической оси *Z* кристалла КТР использовался кварцевый ротатор 10. Линза 11 с фокусным расстоянием 150 мм формировала пучок с диаметром перетяжки 300 мкм и интенсивностью порядка 120 МВт/см<sup>2</sup>. В перетяжке пучка располагался кристалл КТР. Излучение второй гармоники было поляризовано в горизонтальной плоскости. После преобразования в кристалле КТР энергия импульсов второй гармоники достигала 350 мкДж.

**Титан-сапфировый лазер.** Для эффективной работы импульсного титан-сапфирового лазера требуются плотности энергии импульсов накачки около 1 Дж/см<sup>2</sup>. Исходя из этого, при энергии импульса накачки до 330 мкДж, диаметр пучка накачки, используя линзу 14 с фокусным расстоянием 100 мм, задавался равным 205 мкм.

Конфигурация резонатора выбиралась из условия пространственного согласования пучка накачки с основной модой резонатора  $TEM_{00}$ . Резонатор лазера формировался глухим сферическим зеркалом (с радиусом кривизны 100 мм) 15 и выходным плоским зеркалом 17 с коэффициентом отражения порядка 80% в диапазоне 770–900 нм. База резонатора составляла 30 мм. Выбор коэффициента отраже-

ния выходного зеркала основывался на результатах предварительных расчетов, выполненных в рамках приведенной ниже модели.

В работе использовались два разных активных элемента: АЭ № 1 (недисперсионный) длиной 10 мм с брюстеровской ориентацией граней и концентрацией  $Ti_2O_3$  порядка 0,15%, и АЭ № 2 (дисперсионный) длиной 20 мм с концентрацией  $Ti_2O_3$  порядка 0,07%. У активного элемента № 2 один торец был срезан под углом Брюстера, а на второй торец было нанесено просветляющее покрытие с максимальным пропусканием на  $\lambda = 532$  нм и 800 нм. Длина активных элементов выбиралась, исходя из условия поглощения 90% излучения накачки внутри активной среды.

Для оценки энергетических характеристик титан-сапфирового лазера, использовалась модель лазера, работающего по 4-х уровневой схеме [9]. Согласно данному подходу  $E_{ген}$  и пиковая мощность  $P_{ген}$  генерируемого излучения в импульсе определяются следующими соотношениями:

$$E_{ген} = (\gamma_2/2\gamma)(\Delta N_{макс} - \Delta N_{порог})V_a h\nu_{ген}, \quad (1)$$

$$P_{ген} = \gamma_2 \frac{c}{2L'} h\nu_{ген} Q_{макс}, \quad (2)$$

где  $\gamma = \gamma_i + (\gamma_1 + \gamma_2)/2$  – полные потери за проход,  $\gamma_1 = -\ln(R_1)$  и  $\gamma_2 = -\ln(R_2)$  – логарифмические потери за проход, обусловленные пропусканием зеркал,  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения зеркал,  $\gamma_i = -\ln(1 - T_i)$  – внутренние логарифмические потери,  $T_i$  – коэффициент внутренних потерь за проход,  $V_a = (\pi d_a^2/4)nl_a$  – объем моды  $TEM_{00}$ ,  $d_a$  – диаметр моды,  $L' = L + (n - 1)l_a$  – длина оптического пути в резонаторе,  $L$  – база резонатора,  $n$  – показатель преломления  $Al_2O_3:Ti^{3+}$ ,  $l_a$  – длина активного элемента,  $\nu_{ген}$  – частота излучения генерации,  $h$  – постоянная Планка,  $Q_{макс}$  – максимально достигаемое число фотонов,  $c$  – скорость света,  $\Delta N_{макс}$  и  $\Delta N_{порог}$  – максимально достигаемый и пороговый уровни инверсной населенности, определяемые следующими соотношениями:

$$\Delta N_{макс} = \eta_{нак} E_{нак} / (V_p h\nu_{нак}), \quad (3)$$

$$\Delta N_{порог} = 1 / (V_a B\tau), \quad (4)$$

где  $\eta_{нак}$  – эффективность поглощения излучения накачки,  $E_{нак}$  – энергия импульса излучения накачки,  $V_p = (\pi d_p^2/4)nl_a$  – объем активного элемента прокачиваемый излучением накачки,  $d_p$  – диаметр пучка накачки,  $\nu_{нак}$  – частота излучения накачки,  $B = \sigma I_a c / (V_a L')$  – скорость вынужденного излучения на один фотон в моде,  $\sigma$  – сечение стимулированных переходов испускания,  $\tau$  – время жизни воз-

бужденного состояния. Величина  $Q_{макс}$  определяется соотношением

$$Q_{макс} = V_a \Delta N_{порог} (x - \ln(x) - 1), \quad (5)$$

где  $x = \Delta N_{макс} / \Delta N_{порог}$  – превышение над порогом.

Оценка длительности импульса генерации  $\tau_{ген}$  ТСЛ может быть проведена из следующего выражения:

$$\tau_{ген} = E_{ген} / P_{ген}. \quad (6)$$

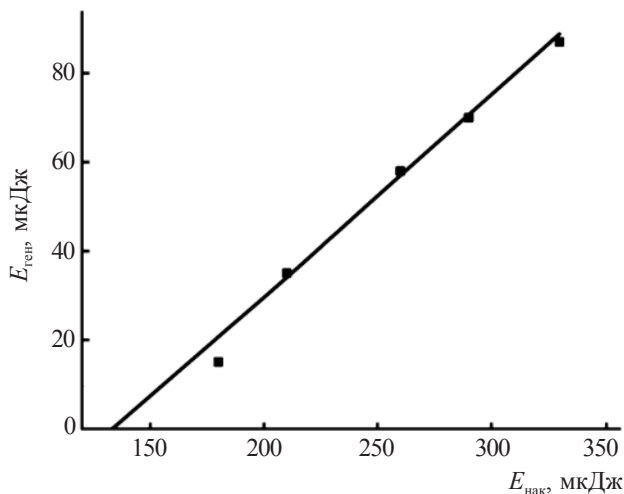
Длительность импульсов излучения измерялись с помощью скоростного германиевого фотодиода ФП-150П и цифрового осциллографа *Tektronix TDS 3052B*. Энергия излучения измерялась с помощью цифрового прибора *Ophir Laser Star*.

Параметр качества пучка  $M^2$  излучения ТСЛ определялся по методике, основывающейся на гиперболической аппроксимации зависимости диаметров пучка от расстояния в области перетяжки, формируемой тонкой линзой. Диаметры пучков определялись методом моментов второго порядка с использованием поперечных профилей распределения интенсивности излучения, регистрируемых с помощью камеры *ElectroPhysics 7290 Infrared Vidicon (Coherent)* с набором аттенуаторов, не искажающих профиль пучка [10].

## Результаты и обсуждение

Экспериментальная зависимость энергии выходного излучения ТСЛ от энергии излучения накачки (вторая гармоника) и зависимость, полученная с использованием вышеописанной модели, при использовании коэффициента внутренних потерь за проход  $T_i$ , равного 0,03, представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Пороговая плотность энергии импульсов накачки ТСЛ составила 0,4 Дж/см<sup>2</sup>. При максимальной плотности импульсов накачки в 1 Дж/см<sup>2</sup> энергия импульсов генерации была равна 85 мДж. Внешний дифференциальный квантовый выход ТСЛ составляет около 41% (по отношению к излучению второй гармоники).

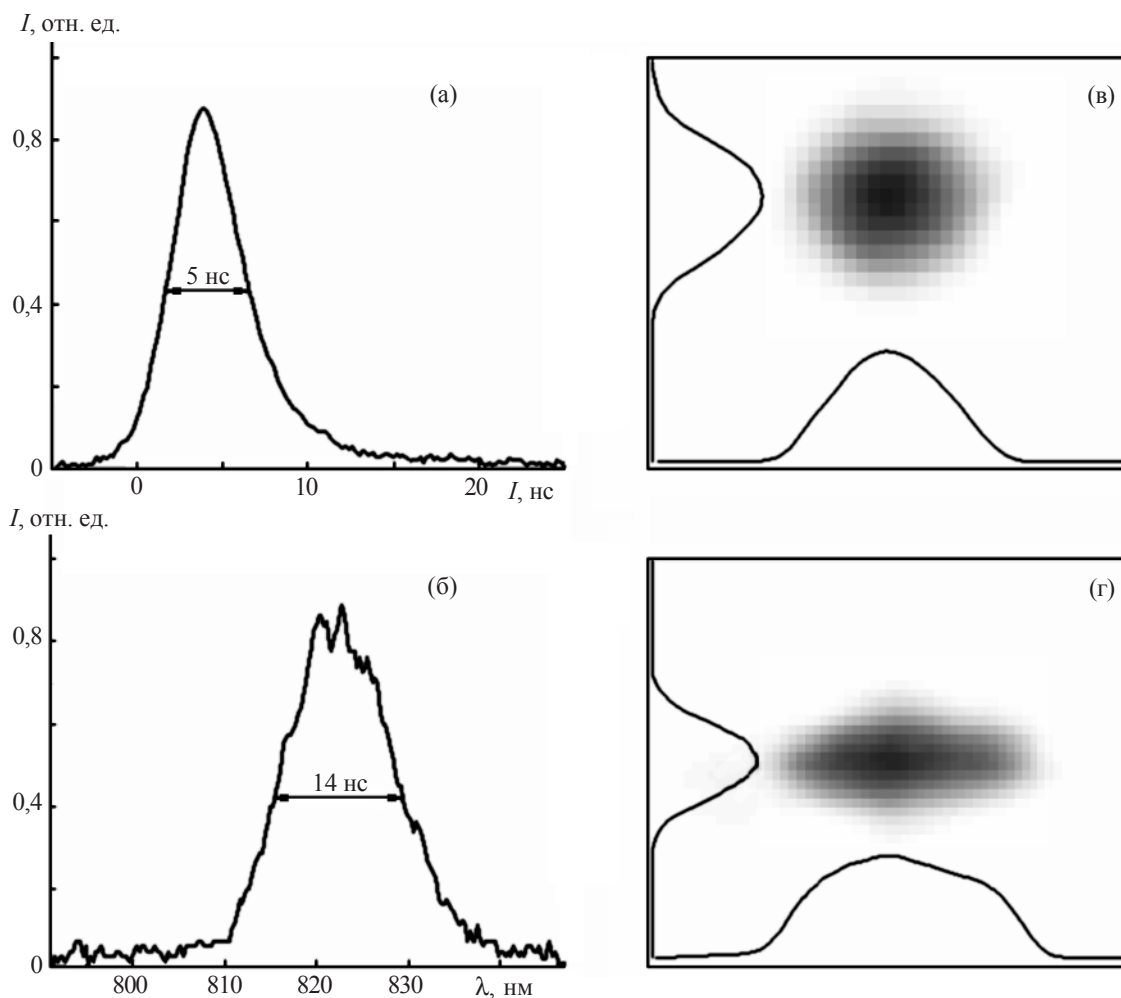
Осциллограмма импульса, спектр и поперечный профиль распределения интенсивности излучения титан-сапфирового лазера представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3а, длительность импульса излучения ТСЛ составляет 5 нс. При использовании АЭ с одной брюстеровской гранью получена перестройка длины волны генерации в ближнем ИК диапазоне от 770 нм до 840 нм посредством вращения выходного зеркала. Диапазон перестройки ограничивался спектральными характеристиками зеркал резонатора. Типичный спектр генерируемого излучения ТСЛ



**Рис. 2.** Зависимость энергии выходного излучения  $E_{\text{ген}}$  титан-сапфирового лазера от энергии излучения накачки  $E_{\text{нак}}$  (вторая гармоника). Линией показаны расчетные значения, точками – экспериментально полученные данные.

приведен на рис. 3б. Ширина спектра генерации составляет 14 нм.

Поперечные профили распределения интенсивности излучения ТСЛ для недисперсионного и дисперсионного АЭ представлены на рис. 3в и рис. 3г соответственно. На основании гиперболической аппроксимации зависимости диаметров пучка от расстояния в области перетяжки, формируемой тонкой линзой, определен параметр качества пучка  $M^2$ . В схеме с недисперсионным активным элементом  $M^2 = 1,1$ . При использовании дисперсионного АЭ поперечный профиль распределения интенсивности излучения ТСЛ не являлся круговым, поэтому параметр качества  $M^2$  генерируемого пучка измерялся в двух взаимно ортогональных направлениях, соответствующих минимальному ( $Ox$ ) и максимальному ( $Oy$ ) размерам пучка. Значения параметров качества пучка в данном случае во взаимно ортогональных направлениях составили  $M_x^2 = 1,4$  и  $M_y^2 = 2,4$ .



**Рис. 3.** Характеристики выходного излучения титан-сапфирового лазера. а – осциллограмма импульса излучения, б – спектр генерации, в – поперечный профиль распределения интенсивности излучения для недисперсионного АЭ, г – поперечный профиль распределения интенсивности излучения для дисперсионного АЭ.

## Заключение

Разработан и создан компактный эффективный перестраиваемый источник лазерного излучения на основе кристалла титан-сапфира, накачиваемого излучением второй гармоники неодимового лазера с продольной диодной накачкой. Максимальная энергия импульсов излучения ТСЛ составляет 85 мкДж при длительности 5 нс и внешнем дифференциальном квантовом выходе 41%. Значение энергии импульса выходного излучения созданного титан-сапфирового лазера с продольной диодной накачкой сопоставимо по порядку величины со значениями, получаемыми при использовании в качестве задающего источника неодимового лазера с поперечной диодной накачкой, что делает его более привлекательным с точки зрения простоты, компактности и эффективности. Параметр качества выходного пучка созданного титан-сапфирового лазера составляет  $M^2 = 1,1$  при использовании недисперсионного активного элемента. При использовании дисперсионного активного элемента параметры качества составляют  $M_x^2 = 1,4$  и  $M_y^2 = 2,4$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борейшо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Владосов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В. Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 12. С. 1167–1178.
2. Denker B., Galagan B., Ivleva L., Osiko V., Sverchkov S., Voronina I., Hellstrom J.E., Karlsson G., Laurell F. Luminescent and laser properties of Yb-Er:GdCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>: a new crystal for eye-safe 1.5-mm lasers // Appl. Phys. B. 2004. P. 577–581.
3. Guerra D.V., Coyle D.B., Krebs D.J. A completely solid state Ti:sapphire laser system for lidar and atmospheric spectroscopy // Measurement Science and Technology. 1994. P. 1306–1308.
4. Steele T.R., Gerstaberger D.C., Drobshoff A., Wallace R.W. Broadly tunable high-power operation of an all-solid-state titanium-doped sapphire laser system // Opt. Lett. 1991. V. 16. № 6. P. 399–401.
5. Marker G.T., Ferguson A.I. Ti:sapphire laser pumped by a frequency-doubled diode-pumped Nd:YLF laser // Opt. Lett. 1990. V. 15. № 7. P. 375–377.
6. Богатов А.П., Дракин А.Е., Микаелян Г.Т., Мифтахутдинов Д.Р., Стадничук В.И., Стародуб А.Н. Эффективность резонансной накачки и оптическое усиление в фосфатном Nd-стекле при возбуждении излучением диодных матриц // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 4. С. 302–308.
7. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985.
8. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. Berlin: Springer, 2006. 508 p.
9. Звельто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1984. 197 с.
10. Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Паращук В.В., Буров Л.И., Щемелев М.А., Рябцев А.Г., Машико В.В., Тепляшин Л.Л., Красковский А.С. Пространственные и поляризационные свойства выходного пучка эрбий-иттербиевого лазера с поперечной диодной накачкой // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 5. С. 10–14.