

文章编号:1001-5078(2012)03-0288-04

· 激光器技术 ·

## 二极管泵浦 Yb:YAG 准三能级 1024 nm 薄盘激光器

王爱国<sup>1</sup>, 王君光<sup>2</sup>, 李永亮<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学科技园, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**采用二极管泵浦 Yb:YAG 晶体实现准三能级连续 1024 nm 薄盘激光器, 1024 nm 谱线是由 Yb:YAG 晶体内的  $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$  能级跃迁实现的, 实验中采用折叠腔结构。泵浦光 16 次通过 Yb:YAG 晶体, 当注入泵浦功率为 17.9 W 时, 1024 nm 激光输出功率为 370 mW, 通过采用 I 类临界位相匹配  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) 晶体进行腔内二次谐波倍频, 获得最大输出功率为 45 mW 的 512 nm 蓝-绿激光稳定输出, 蓝-绿色激光 30 min 功率稳定度优于 4.3%。

**关键词:**激光二极管泵浦; 全固态激光器; 薄盘激光器; Yb:YAG 晶体

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.010

## Diode-pumped Yb:YAG quasi-three level thin-disk laser with 1024 nm output

WANG Ai-guo<sup>1</sup>, WANG Jun-guang<sup>2</sup>, LI Yong-liang<sup>3</sup>

(1. Science Park, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of OptoElectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

3. School of OptoElectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** For the first time, we present a quasi-three-level Yb:YAG laser operating in continuous wave (CW) mode. It is based on the  $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$  transition and outputs 1024 nm wavelength. The use of a pump module with 16 light passes through the crystal allows the realization of a folded cavity Yb:YAG thin-disk laser with 370 mW output power at 1024 nm when the pump power is 32.2 W. Moreover, intra-cavity second-harmonic generation (SHG) has also been achieved with a power of 45 mW at 512 nm by using a  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) nonlinear crystal. The power stability in 30 minutes is better than  $\pm 4.3\%$ .

**Key words:** diode-pumped; solid-state lasers; thin-disk laser; Yb:YAG crystal

### 1 引言

在过去几年里,人们已经成功获得了准三能级固体激光器,例如,  $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$  跃迁的 0.9  $\mu\text{m}$  掺铈离子激光器<sup>[1-2]</sup>,  $^3H_4 - ^3H_6$  跃迁的 2.02  $\mu\text{m}$  掺铥离子激光器<sup>[3]</sup>,  $^5I_7 - ^5I_8$  跃迁的 2.08  $\mu\text{m}$  掺铈离子激光器<sup>[4]</sup>和  $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$  跃迁的 1.03  $\mu\text{m}$  掺镱离子激光器等<sup>[5-7]</sup>。由于 Yb:YAG 晶体具有量子效率高,激光上能级寿命长,激发态吸收低以及激光发射带宽等优势,使得它成为二极管泵浦固态激光器 (DPSS) 中应用前景最好的增益介质之一。因此,在最近几年人们已经深入开展对 Yb:YAG 激光器的研

究。图 1 为 Yb:YAG 晶体能级跃迁图,在 Yb:YAG 激光器中人们一般通过  $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$  能级跃迁实现 1030 nm 和 1048 nm 两个谱线发射,而很少实现短波长谱线发射。最近,有人报道了掺铈离子短波长激光器,例如 880 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[8]</sup>, 879 nm Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[9]</sup>和 869 nm Nd:YAG 激光器<sup>[10]</sup>。

**基金项目:**“十一五”预研支撑基金项目 (No. 62301110109) 资助。

**作者简介:**王爱国 (1965 -), 男, 助理研究员, 主要从事激光技术及光电仪器等方面的研究。

**收稿日期:** 2011-03-29; **修订日期:** 2011-07-12

本文报道了激光二极管泵浦 1024 nm Yb:YAG 激光器,并通过腔内倍频实现了 512 nm 的蓝-绿激光输出。

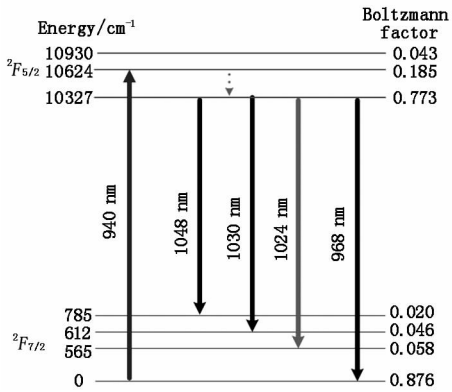


图 1 Yb:YAG 晶体能级跃迁图

Fig. 1 energy level diagram of Yb<sup>3+</sup> ion in YAG crystal

2 实验方案

实验装置如图 2(a) 所示。实验中所用的两个泵浦源是德国 DILAS 半导体激光有限公司生产的最大连续输出功率 20 W 的光纤耦合激光二极管,泵浦波长为 940 nm,发射光谱宽度为 3.0 nm,光纤芯直径为 400 μm,数值孔径为 0.22。实验中使用的激光增益介质为掺镱离子浓度为 10% 的 Yb:YAG 晶体,其厚度 3 mm。晶体片靠近泵浦源一端镀 940 nm,1024 nm HR,另一端面镀 940 nm,1024 nm HR。晶体安装在水冷式散热器的表面上,目的是控制其温度保持在 (15 ± 0.1) °C 范围内。凹面反射镜

(f = 32 mm) 和折叠棱镜实现了泵浦光 16 次通过 Yb:YAG 晶体。M1 为曲率半径为 50 mm 的凹面镜,凹面镀 1024 nm HR,1030 ~ 1050 nm HT,目的是抑制 1030 ~ 1050 nm 范围的波长发生强烈震荡。平面镜 M2 作为输出镜,端面镀膜参数为 T = 2.3% @ 1024 nm,在谐振腔内插入 Fabry-Perot 标准具选择输出激光波长。

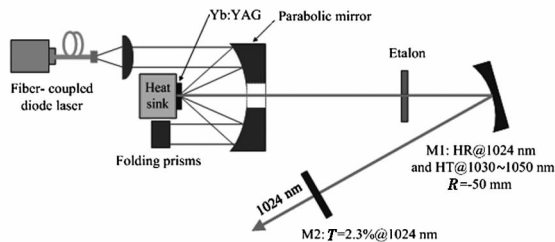
3 实验结果

测量 1024 nm 激光输出功率随注入泵浦功率变化的关系,如图 3(a) 所示。1024 nm 激光的阈值功率为 5.1 W,当注入泵浦功率为 17.9 W 时,1024 nm 最大输出功率为 370 mW。产生这种高阈值的原因是低能级跃迁时越接近基态,激光能级越低,实现粒子数反转越难,激光吸收效率越高。利用到刀口法测得 1024 nm 激光器的光束质量因子 M<sup>2</sup> = 1.13,说明输出激光为 TEM<sub>00</sub> 模,利用 Field-Master-GS 测量了 1024 nm 激光输出的稳定性,得出在输出功率为 370 mW 时,其 30 min 功率稳定度优于 ±3.5%。用高分辨率光谱仪测量 1024 nm 激光光谱,如图 4 所示。为了实现高效腔内倍频,我们用曲率半径为 200 mm 的平凹镜 M3 作为输出镜,其凹面镀 1024/512 nm HR,512 nm AR,这使得腔内通过非线性晶体的两个束腰强度增强,从而提高非线性转换效率。由图 2(b) 所示的 V 形腔实现了 512 nm 蓝-绿激光输出,图 3(b) 所示为 512 nm 蓝-绿激光输出功率随注入泵浦功率变化的关系。图 5 为用荷兰 Avantes 公司型号为 Avaspec - 2048x14 的光栅光谱仪测量了 512 nm 激光光谱。在实验中,增益介质和备品晶体所在的光学臂长度分别为 64 mm 和 30 mm,非线性倍频晶体采用 I 类临界位相匹配 LBO,长为 10 mm,沿 x - y 轴的切割角度为 θ = 90°,Φ = 13.9°,LBO 晶体双面镀 1024/512 nm AR,被置于 V 形腔的 M1 - M3 光学臂内,靠近凹面镜 M3。

在高功率 LD 端面泵浦固体激光器中,激光晶体的热效应是不能获得高效率、高输出功率激光的一个重要因素,即使在中功率的情况下,激光晶体的热效应仍很明显。根据稳态热传导方程<sup>[11]</sup>:

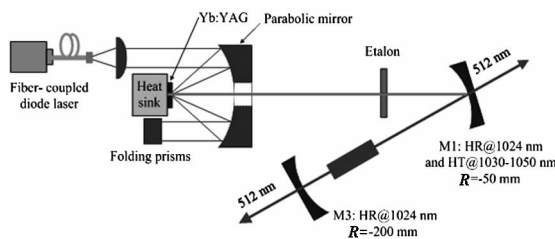
$$\frac{1}{f_{th}} = \frac{\xi P_{abs}}{4\pi K_c \omega_p^2} [dn/dT + (n_0 - 1)\alpha_T]$$

可以计算热透镜焦距。其中, f<sub>th</sub> 是热透镜焦距; ξ 为热负荷比; P<sub>abs</sub> 为吸收的泵浦功率; K<sub>c</sub> 为热导率; n<sub>0</sub> 为环境温度下的激光晶体的折射率; dn/dT 为折射率温度系数; α<sub>T</sub> 为热膨胀系数; ω<sub>p</sub> 平均泵浦光斑半径。



(a) 1024 nm 激光器实验装置图

(a) the ground state

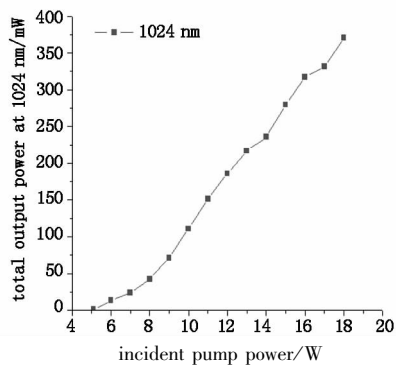


(b) 倍频激光器实验装置图

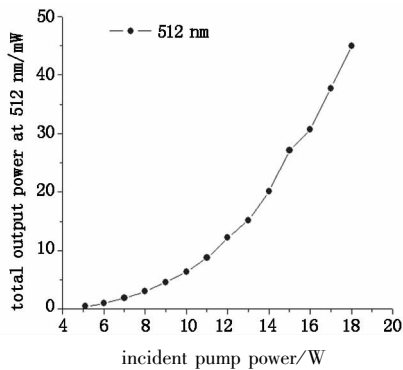
(b) the frequency-doubled laser

图 2 激光器实验装置图

Fig. 2 experimental setup of ground state frequency-doubled laser



(a) 1024 nm 激光输出功率随泵浦功率关系



(b) 512 nm 激光输出功率随泵浦功率关系

图3 激光输出功率随泵浦功率关系

Fig. 3 output powers at 1024 nm and 512 nm versus pump power

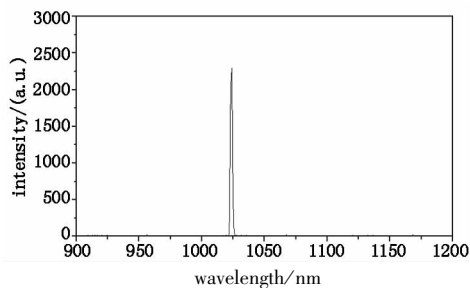


图4 1024 nm 激光光谱

Fig. 4 the laser spectrum line of 1024 nm laser

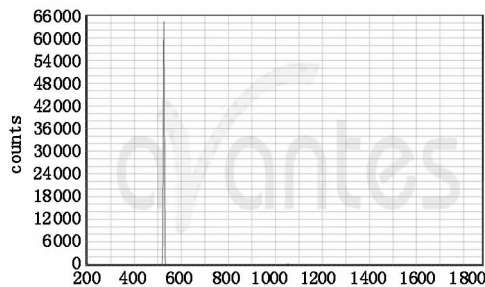


图5 512 nm 激光光谱

Fig. 5 the laser spectrum line of 512 nm laser

在本实验中,所用的 Yb:YAG 的有关参数如下:  
 $\xi = 0.4$ ,  $K_c = 9.48 \text{ W/mK}$ ,  $\omega_p = 200 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,  $n_0 = 1.82$ ,  $\alpha_T = 7.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。经过计算,当泵浦功率为 17.9 W 时,Yb:YAG 的热透镜焦距约为 103 mm。可以看出,热透镜的焦距值与

两个光学臂的长度非常接近,确定激光器在稳区内工作,并且当增大泵浦功率时,热焦距会进一步变短。

图 3(b) 显示了 512 nm 倍频光输出功率随 940 nm 注入泵浦功率变化的关系,当注入泵浦功率为 17.9 W 时,测得 512 nm 蓝-绿激光输出功率为 45 mW。在 X 方向和 Y 方向的  $M^2$  因子分别为 1.24 和 1.35。由于基频波和二次谐波在非线性 LBO 晶体内发生走离现象导致了两个方向上的  $M^2$  因子不对称。蓝-绿色激光 30 min 功率稳定度优于 4.3%,输出激光质量良好,功率稳定。

#### 4 结论

采用二极管泵浦 Yb:YAG 晶体实现准三能级连续 1024 nm 激光器。当注入泵浦功率为 17.9 W 时,1024 nm 激光输出功率为 370 mW,并体采用 I 类临界位相匹配 LBO 进行腔内倍频,获得最大输出功率为 45 mW 的 512 nm 蓝-绿激光,蓝-绿色激光 30 min 功率稳定度优于 4.3%。本文为探究新波长激光器提供了一个方向,并且利用更有效的非线性晶体可以得到更高效的非线性转换。

#### 参考文献:

- [1] Meng Yuqing, Tan Huiming, Fu Xihong, et al. LD pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO intracavity sum-frequency 491 nm blue laser [J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(7): 1735 - 1739. (in Chinese)  
孟玉青, 檀慧明, 付喜宏, 等. LD 抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 腔内和频 491 nm 蓝光激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1735 - 1739.
- [2] Y F Lü, X H Zhang, J Xia, et al. Highly efficient continuous-wave 912 nm Nd:GdVO<sub>4</sub> laser emission under direct 880 nm pumping [J]. Laser Physics Letter, 2009, 6(11): 796 - 799.
- [3] Paul J M Suni, Sammy W Henderson. 1 mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3 W diode laser [J]. Optics Letters, 1991, 16(11): 817 - 819.
- [4] T Y Fang, Huber R L Byer, P Mitzscherlich. Spectroscopy and diode laser-pumped operation of Tm, Ho:YAG [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1988, QE - 24, 924 - 933.
- [5] Jiang Dongbin, Duan Wentao, Xu Meijian, et al. High-Power Laser Diode End-Pumped Yb:YAG Repeat Frequency Laser [J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(7): 1831 - 1834. (in Chinese)  
蒋东滨, 段文涛, 徐美健, 等. 高功率激光二极管端面抽运重复频 Yb:YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1831 - 1834.

- [6] J Aus der Au, G J Spühler, T Südmeyer, et al. 16.2 W Average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11):859 – 861.
- [7] Joerg Neuhaus, Dominik Bauer, Jing Zhang, et al. Subpicosecond thin-disk laser oscillator with pulse energies of up to 25.9 microjoules by use of an active multipass geometry [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20530 – 20539.
- [8] E Hérault, F Balembois, P Georges. Nd:GdVO<sub>4</sub> as a three-level laser at 879 nm [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(18): 2731 – 2733.
- [9] M Castaing, F Balembois, P Georges. Continuous-wave laser at 440 nm based on frequency-doubled diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17): 1957 – 1959.
- [10] Yanfei Lü, Jing Xia, Weibo Cheng, et al. Diode-pumped cw Nd:YAG three-level laser at 869 nm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3670 – 3672.
- [11] Yungfu Chen. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(6): 397 – 399.