

# 激光二极管抽运 10.5 W *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 连续激光器的研究

李林军<sup>1,2</sup> 杨曦凝<sup>3</sup> 白云峰<sup>2</sup> 张治国<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学理学院物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

<sup>2</sup>黑龙江工程学院光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150050

<sup>3</sup>哈尔滨玻璃钢研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 设计并研究了高功率和高效率 2044 nm *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 连续激光器。利用中心波长为 794.75 nm 激光二极管双端面抽运 *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 晶体, 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×7 mm, 其中 Tm<sup>3+</sup> 和 Ho<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数分别为 5% 和 0.3%, 晶体采用液氮制冷。激光晶体的两个端面均镀有 792~796 nm 和 1900~2100 nm 的高透膜。*c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的谐振腔由一个平凹镜和一个平镜构成平凹腔, 谐振腔的物理腔长为 150 mm。通过改变激光二极管的温度变换抽运波长, 实验获得了 10.5 W 的连续输出功率和 37.4% 的光光转换效率。

**关键词** 激光器; 连续波; 输出功率; 抽运波长; 转换效率; 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.051403

## A Continuous-Wave *c*-Cut Tm, Ho:YAP Laser with 10.5 W Output Pumped by a Laser Diode

Li Linjun<sup>1,2</sup> Yang Xining<sup>3</sup> Bai Yunfeng<sup>2</sup> Zhang Zhiguo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup>Institute of Optoelectronic Technology, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150050, China

<sup>3</sup>Harbin FRP Institute, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** A high power and efficiency continuous-wave 2044 nm *c*-cut Tm, Ho:YAP laser is designed and fabricated. Based on a dual-end pumped scheme, a *c*-cut Tm, Ho:YAP crystal is pumped by a laser diode with centre wavelength of 794.75 nm, the dimensions of crystal is 4 mm×4 mm×7 mm, its co-doped atomic fraction are 5% Tm and 0.3% Ho, and the laser crystal is cooled by liquid N<sub>2</sub>. The end faces of laser crystal polished plane are both coated by 790~800 nm and 1900~2100 nm with reflectivity less than 0.5%. The resonator cavity of *c*-cut Tm, Ho:YAP is a plano-concave cavity with a plano-concave mirror and a flat mirror, and its physical cavity length is 150 mm. The different pumped wavelengths are changed by altering the temperature of laser diode in experiment, a measured maximum output power of 10.5 W is achieved with an optical-optical conversion efficiency of 37.4%.

**Key words** lasers; continuous-wave; output power; pumped wavelength; conversion efficiency; crystal

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.3600

## 1 引言

2 μm 波段激光光源处于人眼安全波段, 具有大气透过性能好、可用于光纤传输等优点<sup>[1-2]</sup>。因此, 2 μm 波段激光在医疗、环境监测、激光雷达、遥感探测、测距等领域具有十分广泛的应用<sup>[1-8]</sup>。激光二极管(LD)抽运掺 Tm<sup>3+</sup> 和 Ho<sup>3+</sup> 晶体的固态激光器具有体积小、质量轻、结构紧凑、光束质量好等特点, 是实现高效 2 μm 波段连续(CW)以及调 Q 脉冲激光输出最有效的途径之一<sup>[8-12]</sup>; 而具有掺杂浓度高、发射截面大、偏振激光输出及阈值低、适合 LD 抽运等特点的激光晶体还可以实现高效低阈值 2 μm 波段激光输出, 可以满足更多的实

收稿日期: 2013-11-11; 收到修改稿日期: 2013-12-27; 网络出版日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61378029)、中国博士后基金(20100481005, 201104422)

作者简介: 李林军(1978—), 男, 博士后, 主要从事激光光谱和固态激光技术方面的研究。E-mail: lilj2013@126.com

\*通信联系人。E-mail: zhangzhiguo@hit.edu.cn

际应用需要,是目前中红外固体激光研究领域的热点。

铝酸钇晶体(YAP)分子式为 $YAlO_3$ ,具有正交晶系结构,是 $Y_2O_3-Al_2O_3$ 系统中的另一个化合物,它所具有的双折射特性可抑制热致双折射<sup>[13-14]</sup>。材料结构上的各向异性使其受激发射截面也是各向异性,致使不同取向的掺杂YAP晶体具有不同的激光功能、输出波长及运转形式、适宜作连续运转激光器的工作物质<sup>[15-16]</sup>。此外,YAP晶体具有掺杂浓度高、发射截面大、偏振激光输出及阈值低、荧光寿命长、适合LD抽运等优点,是具有潜在用途的激光材料<sup>[15-19]</sup>。

近年来,随着Tm,Ho:YAP晶体生长技术的成熟,国内外许多激光研究者开始越来越多地关注这种晶体的激光性能。2008年,姚宝权等<sup>[20]</sup>利用 $c$ 轴切割的Tm,Ho:YAP激光器获得连续及脉冲输出功率超过5 W,2011年,李林军等<sup>[16]</sup>报道了794.8 nm的LD双端面抽运 $c$ 轴切割Tm,Ho:YAP晶体,激光晶体尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,激光器连续输出功率超过9 W,激光器输出波长为2044 nm。

本文采用双端面抽运耦合技术,794.75 nm LD直接抽运Tm,Ho:YAP晶体并对激光晶体采用低温液氮制冷,在有效减小激光晶体热效应的基础上使其更加均匀地吸收抽运光。通过优化设计激光器结构,实验获得了输出功率高达10.5 W的连续运转的2044 nm激光输出,光光转换效率达到37.4%。

## 2 实验装置

图1为LD双端面抽运 $c$ 轴切割Tm,Ho:YAP激光器的实验装置图。抽运源采用美国Light公司生产的光纤耦合输出的LD,光纤芯径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.22,中心输出波长794.75 nm,最大输出功率为28.1 W。LD输出的抽运光经过平凸透镜 $L_1$ 准直后,由分束镜(BS)分成两束光,经过 $M_2$ 、 $M_3$ 和 $M_4$ 再分别由平凸透镜 $L_2$ 和 $L_3$ 聚焦,从激光晶体的两个端面注入激光晶体中,双端面抽运有效地缓解了热效应,准直聚焦到晶体中的抽运光斑为 $571\text{ }\mu\text{m}$ 。实验中选用Tm、Ho:YAP作为激光晶体,尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ,其中 $Tm^{3+}$ 和 $Ho^{3+}$ 掺杂原子数分数分别为5%和0.3%,激光晶体的两个端面均镀有792~796 nm和1900~2100 nm的高透膜;激光晶体除端面外,其余部分用铝箔包住放在紫铜热沉中;为了进一步缓解热效应,激光晶体采用液氮制冷。平镜 $M_2$ ~ $M_5$ 是抽运光高反射镜,均镀有 $45^\circ$ 的对792~796 nm的高反膜(反射率 $R_{792-796} > 99.8\%$ )。平镜 $M_1$ 为二色镜,两面都镀有 $45^\circ$ 的对792~796 nm的高透膜,其中靠近激光晶体面同时镀有 $45^\circ$ 的对1900~2100 nm高透膜。谐振腔由平凹镜HR和平镜OC构成,谐振腔的物理腔长为150 mm。HR的曲率半径为 $-300\text{ mm}$ ,两面都镀有 $0^\circ$ 的对792~796 nm的高透膜,凹面镀有 $0^\circ$ 的对1900~2100 nm高反膜( $R_{1900-2100} > 99.8\%$ );OC为输出耦合镜(透射率 $T_{1900-2100} \approx 22\%$ )。

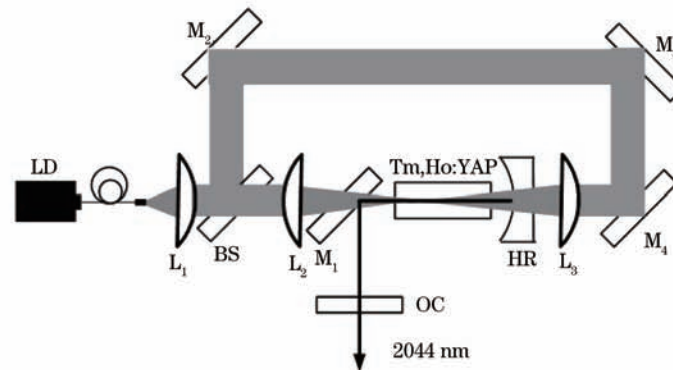


图1 双端面抽运 $c$ 轴切割Tm,Ho:YAP激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of a double end pumped  $c$ -cut Tm,Ho:YAP laser

## 3 实验结果与分析

图2是在2.17 W的抽运功率( $P_{in}$ )下,用功率计(LabMax-TOP/PM30,美国相干公司)测量 $c$ 轴切割Tm、Ho:YAP激光器在不同抽运波长下输出功率的曲线。在此实验中,变换LD的运行温度,LD的输出波长从794.45 nm变化到796.25 nm;当LD的输出波长为794.45 nm和794.75 nm时,Tm,Ho:YAP激光器输出功率比较接近,分别为474 mW和482 mW,且482 mW是几种抽运波长下Tm,Ho:YAP激光器的最高输出功率;

当LD的输出波长在795.05~796.25 nm时,Tm,Ho:YAP激光器的输出功率逐渐降低,最低输出功率为160 mW。可见,c轴Tm,Ho:YAP激光器谐振腔系统选定后,在接近阈值抽运功率的情况下,抽运波长对阈值抽运功率影响很大,在最佳抽运波长下,阈值抽运功率较低。通过单色仪(WDG30,北京北光世纪仪器有限公司)测量c轴切割Tm,Ho:YAP激光器的输出波长为2044 nm。

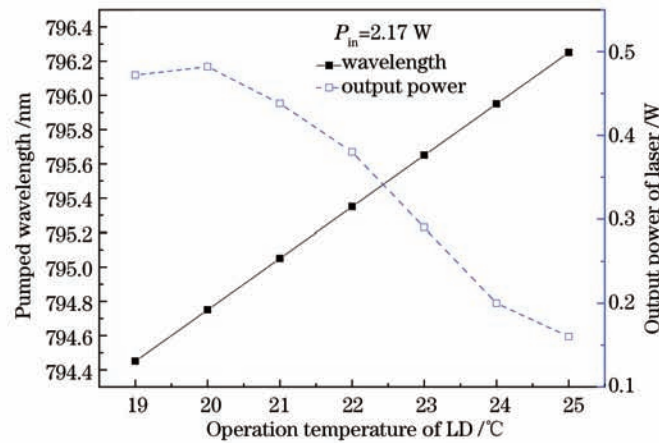


图2 在2.17 W抽运功率下,抽运波长和激光器输出功率曲线

Fig.2 Curves of pump wavelength and laser output power with pump power of 2.17 W

图3是不同抽运波长下,c轴切割Tm,Ho:YAP激光器输出功率曲线。在Tm,Ho:YAP晶体中注入28.1 W的抽运功率,通过调节LD的运行温度使其输出波长分别固定在795.95、795.65、795.35、795.05、794.75、794.45 nm,Tm,Ho:YAP激光器的最高输出功率分别为9.56、10.1、10.4、10.5、10.5、10.5 W,相应的光光转换效率分别为34.0%、35.9%、37.0%、37.4%、37.4%、37.4%,相应的斜率效率分别为36.9%、39.0%、40.1%、40.5%、40.5%、40.5%。从图3可知,Tm,Ho:YAP晶体中注入的抽运功率由24.1 W增加到26 W,改变LD运行温度使其按上述输出波长抽运Tm,Ho:YAP激光器,激光器输出功率分别增加0.90、1.02、0.91、0.91、0.94、0.95 W,相应的斜率效率分别为47.4%、53.7%、47.9%、47.9%、49.5%、50%;当抽运功率由26 W增加到28.1 W,Tm,Ho:YAP输出功率分别增加0.86、0.88、0.77、0.77、0.81、0.85 W,相应的斜率效率分别为40.9%、41.9%、36.7%、36.7%、38.6%、40.5%。由实验所得的数据可知,在6种选定的抽运波长下,注入Tm,Ho:YAP激光器中的抽运功率由24.1 W增加到28.1 W,激光器的输出功率不断增加,输出斜率效率全部下降,其中选定794.45 nm的抽运波长,激光器的输出斜率效率下降较小且激光器输出功率最高。

图4是c轴切割Tm,Ho:YAP激光器在不同的抽运波长下,激光器的最高输出功率。在Tm,Ho:YAP晶体中注入28.1 W的抽运功率,选用抽运波长为795.05、794.75、794.45 nm,Tm,Ho:YAP激光器的最高输出功率都是10.5 W,选用其他波长的抽运光激光器的最高输出功率都低于10.5 W;在6种波长抽运光分别抽运下,注入激

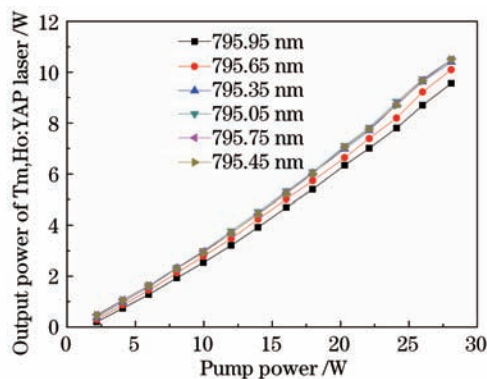


图3 c轴切割Tm,Ho:YAP激光器输出功率曲线

Fig.3 Output power curves of a c-cut Tm,Ho:YAP laser

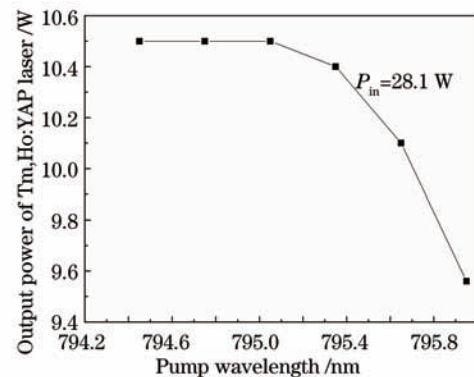


图4 不同抽运波长下,c轴切割Tm,Ho:YAP激光器最大输出功率

Fig.4 Highest output power of a c-cut Tm,Ho:YAP laser in different pump wavelengths

光晶体的抽运功率从 24.1 W 增加到 28.1 W, 激光器输出的斜率效率变化明显。产生上述问题的主要原因是激光器在高功率运行下, 随着注入激光晶体中的抽运功率逐渐增加, 激光晶体的热效应加剧越为严重, 致使激光器输出效率下降。注入 28.1 W 抽运功率后, 抽运波长在 794.45~795.05 nm, 输出波长为 2044 nm 的 *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的输出功率和输出效率都一致, 且比其他三种抽运波长抽运 *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的输出功率和输出效率要高。综合图 2、3 和 4 的内容, 选用 794.45~795.05 nm 的抽运波长, 激光器的增益和损耗匹配较好; 考虑注入抽运功率在 24.1~28.1 W 范围内激光器的斜率效率变化, 在已选用的抽运波长中, 794.45 nm 是 *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的最佳抽运波长。

## 4 结 论

设计了 LD 双端面抽运的连续运转 2044 nm *c* 轴切割的 Tm, Ho:YAP 激光器。考虑热效应对 2044 nm 激光输出的影响, 在选用双端面抽运的方式之外, 采用液氮制冷的方式来缓解激光晶体的热效应。通过比较研究不同抽运波长对 Tm, Ho:YAP 激光器近抽运阈值功率及最高输出功率的影响, 在注入 28.1 W 的抽运功率下, Tm, Ho:YAP 激光器获得了 10.5 W 的输出功率和 37.4% 的光光转换效率。2044 nm Tm, Ho:YAP 激光器输出功率进一步提高, 可以选用 794.45~795.05 nm 的抽运波长, 继续注入抽运功率, 但应考虑光学元器件的损伤情况及光光转换效率对激光器输出的影响。在需要大幅度提高激光器输出功率的情况下, 应该考虑激光器系统的结构优化及激光器运转的稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 X M Duan, B Q Yao, Y J Zhang, *et al.*. Diode-pumped high efficient Tm:YLF laser output at 1908 nm with near-diffraction limited beam quality [J]. *Laser Phys Lett*, 2008, 5(5): 347-349.
- 2 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, *et al.*. 2  $\mu\text{m}$  pulsed laser with 100 mJ intracavity KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2762-2765.  
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 百毫焦腔内 KTP 光参量振荡 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2762-2765.
- 3 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber laser at 2  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601002.  
王 璞, 刘 江. 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601002.
- 4 Fan Fengying, Song Zengyun. Measurement of CO<sub>2</sub> concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy near 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0215002.  
范凤英, 宋增云. 2  $\mu\text{m}$  附近二极管激光吸收光谱 CO<sub>2</sub> 浓度测量研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0215002.
- 5 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0702006.  
魏 磊, 肖 磊, 韩 隆, 等. Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702006.
- 6 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0  $\mu\text{m}$  [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902001.  
刘 江, 王 璞. 高功率被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902001.
- 7 Liu Jiang, Wang Pu. Thulium-doped all-fiber broadband superfluorescent source at 2  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202006.  
刘 江, 王 璞. 掺铥全光纤结构 2.0  $\mu\text{m}$  波段宽带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202006.
- 8 M Schellhorn. Performance of a Ho:YAG thin-disc laser pumped by a diode-pumped 1.9  $\mu\text{m}$  thulium laser [J]. *Appl Phys B*, 2006, 4(85): 549-552.
- 9 Y F Li, Y Z Wang, B Q Yao. Comparative optical study of thulium-doped YAlO<sub>3</sub> and GdVO<sub>4</sub> single crystals [J]. *Laser Phys Lett*, 2008, 5(1): 37-40.
- 10 X M Duan, B Q Yao, C W Song, *et al.*. Room temperature efficient continuous wave and Q-switched Ho:YAG laser double-pass pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2008, 5(11): 800-803.
- 11 Y F Li, Y Z Wang, B Q Yao, *et al.*. Upconversion spectrum of Tm, Ho:GdVO<sub>4</sub> pumped by pulse and CW laser at 800 nm [J]. *Laser Phys Lett*, 2008, 5(8): 597-599.
- 12 C T Wu, Y L Ju, Z G Wang, *et al.*. Diode-pumped single frequency Tm:YAG laser at room temperature [J]. *Laser Phys*

- Lett, 2008, 5(11): 793–796.
- 13 B Dischler, H Ennen. Polarized anisotropic photoluminescence of laser-related transitions in  $\text{YAIO}_3:\text{Nd}$  and  $\text{YAIO}_3:\text{Er}$  and line broadening by resonant lattice phonons [J]. *J Appl Phys*, 1986, 60(1): 376–382.
- 14 M J Weber, M Bass, K Andringa, *et al.*. Czochralski growth and properties of  $\text{YAIO}_3$  laser crystals [J]. *Appl Phys Lett*, 1969, 15(10): 342 – 345.
- 15 I F Elder, M J P Payne. YAP versus YAG as a diode-pumped host for thulium [J]. *Opt Commun*, 1998, 148(4–6): 265–269.
- 16 L J Li, B Q Yao, J P Qin, *et al.*. High power and efficiency of a 2044-nm *c*-cut  $\text{Tm,Ho:YAIO}_3$  laser [J]. *Laser Phys*, 2011, 21(3): 489–492.
- 17 Lu Yanling, Wang Jun, Yang Yang, *et al.*. Czochralski growth and spectral characteristics of  $\text{Tm:YAP}$  single crystals [J]. *J Inorganic Materials*, 2006, 24(4): 838–842.
- 陆燕玲, 王 俊, 杨 扬, 等.  $\text{Tm:YAP}$  晶体生长及光谱特性研究[J]. *无机材料学报*, 2006, 21(4): 838–842.
- 18 Zhang Xinlu, Cui Jinhui. Characteristics of LD end-pumped CW 2  $\mu\text{m}$   $\text{Tm,Ho:YLF}$  solid-state laser [J]. *J Harbin Engineering Univeristy*, 2006, 27(2) : 301–304.
- 张新陆, 崔金辉. 激光二极管端面抽运 2  $\mu\text{m}$   $\text{Tm,Ho:YLF}$  连续激光器的激光特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(2): 301–304.
- 19 Li Cheng, Cao Yuhui, Liu Fuyun, *et al.*. Spectra and laser properties of  $\text{Tm:YAG}$  crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(8): 1087–1091.
- 李 成, 曹余惠, 刘福云, 等.  $\text{Tm:YAG}$  晶体的光谱及激光特性研究[J]. *光学学报*, 1996, 16(8): 1087–1091.
- 20 Baoquan Yao, Linjun Li, Liangliang Zheng, *et al.*. Diode-pumped continuous wave and *Q*-switched operation of a *c*-cut  $\text{Tm,Ho:YAIO}_3$  laser[J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 5075–5081.