

文章编号: 0258-7025(2009)07-1710-04

室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm : YAP 激光器

王月珠¹ 段小明¹ 柯 亮¹ 姚宝权¹ 赵广军²

(¹ 哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)
² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道了一种室温下高效率运行的激光二极管(LD)端面抽运 Tm : YAP 连续波激光器。抽运源使用波长为 795 nm 的光纤耦合二极管激光器, Tm : YAP 晶体 c 轴切割, 掺杂原子数分数为 3%, 尺寸为 3 mm×3 mm×7 mm。当输出镜透射率 T 为 10% 时, 获得 8.12 W 的 1.94 μm 连续波激光输出, 相对应的抽运功率为 26.2 W, 阈值抽运功率为 4.67 W, 斜率效率为 52.1%, 光-光转换效率为 31.0%。使用光栅单色仪测得激光器输出中心波长为 1938.2 nm, 谱线半峰全宽约为 2.9 nm。

关键词 激光技术; 红外固体激光器; 激光二极管抽运; Tm : YAP 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1710

Room Temperature Efficient Continuous Wave Laser Diode-End-Pumped Tm : YAP Laser

Wang Yuezhu¹ Duan Xiaoming¹ Ke Liang¹ Yao Baoquan¹ Zhao Guangjun²

¹ National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract High efficient continuous wave Tm : YAP laser end-pumped by laser-diode (LD) is presented in this paper. In experiment, fiber-coupled LD at 795 nm is used to pump the Tm : YAP crystal. The c-cut Tm : YAP crystal with the dimensions of 3 mm×3 mm×7 mm is doped with the 3% Tm³⁺ (atomic fraction). Under the input pump power of 26.2 W, the highest output power reaches 8.12 W with 10% transmittance, and the laser threshold is 4.67 W, corresponding to slope efficiency of 52.1% and the optical conversion efficiency of 31.0%. The free running laser spectrum of Tm : YAP is measured by using a grating monochromator, and the corresponding central wavelength is 1938.2 nm, with full width at half maximum of 2.9 nm.

Key words laser technique; infrared solid state laser; laser diode pumped; Tm : YAP crystal

1 引 言

激光二极管(LD)抽运 Tm 激光器在激光雷达、医学以及遥感等诸多领域有重要应用^[1]。特别地,它还是产生常温 3~5 μm 光学参量振荡器(OPO)的重要抽运源^[2]。另外, Tm 掺杂激光器在 800 nm 附近有吸收峰,适合于商用的激光二极管抽运^[3~5]。因此,激光二极管抽运的 Tm 激光器成为

近年来国内外的研究热点。1997年, E. C. Honea 等^[6]用激光二极管抽运掺杂原子数分数为 2% 的 Tm:YAG 晶体, 获得了 115 W 的连续波激光输出。1999年, L. A. Pomeranz 等^[7]在室温下对 Tm : YLF 和 Tm : YAP 激光器进行了对比研究, 两种晶体的掺杂原子数分数均为 3%, 使用二极管激光器作为抽运源。对于 Tm:YLF 激光器, 它的阈

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-02-20

作者简介: 王月珠(1942-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光器、光学参量振荡器等方面的研究。

E-mail: yaobq08@hit.edu.cn

值为 5.8 W, 输出波长为 1.91 μm , 输出最大功率为 21.8 W, 斜率效率为 42%; 对于 Tm:YAP 激光器, 它的阈值为 17 W, 输出波长为 1.94 μm , 输出最大功率为 24 W, 斜率效率为 39%。2005 年, H. Kalaycioglu 等^[8]在室温条件下研究了不同掺杂浓度 Tm:YAP 晶体的激光性能, 采用掺杂原子数分数 1.5% 的 Tm:YAP 晶体获得了最高 1.4 W 的 1.94 μm 连续波激光输出。中国在近年来陆续开展了掺 Tm 激光器的研究, 并且取得了一定的成果^[9-11]。2007 年, 李玉峰等^[12]用激光二极管抽运掺杂原子数分数 3% 的 *b* 轴切割 Tm:YAP 晶体, 获得 5.2 W 的 1.98 μm 激光输出, 激光晶体的温度保持在 18 $^{\circ}\text{C}$ 。同年, 林志锋等^[13]报道了 4.04 W 连续功率的激光二极管抽运 Tm:YAG 激光器, 激光晶体的温度保持在 5 $^{\circ}\text{C}$, 斜率效率为 35.4%。

YAP 基质为光学负双轴晶体, 属于斜方晶系, 按棒轴相对晶体的取向不同有 *c* 轴棒和 *b* 轴棒, 并且每种棒有不同的吸收和增益特性, 所以不同取向的 Tm:YAP 晶体可以输出不同波长的激光^[14]。YAP 晶体在热和机械性能等方面与 YAG 相媲美, 能够承受较高的热负载而不至于碎裂。同时由于 YAP 晶体各向异性的特点, 能获得线偏振光输出。Tm:YLF 晶体虽然比 Tm:YAP 晶体的阈值低, 但其抗损伤能力较差, 高功率抽运时容易脆裂。在 Tm:YAG 晶体中, Tm³⁺ 受激发射截面在 $0.3 \times 10^{-20} \sim 0.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 之间, 而在 Tm:YAP 晶体中, Tm³⁺ 的受激发射截面高达 $6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。Tm:YAP 晶体的吸收峰在 795 nm 附近, 比 Tm:YAG 晶体的吸收峰 785 nm 更靠近商用激光二极管的发射波长 (800 nm)。所以激光二极管抽运的 Tm:YAP 激光器能够在常温条件下获得高效率、高功率的激光输出。

本文报道了采用波长为 795 nm 的激光二极管抽运的 *c* 轴切割 Tm:YAP 激光器, Tm:YAP 晶体掺杂原子数分数为 3%, 晶体温度控制在 18 $^{\circ}\text{C}$ 。在抽运功率为 26.2 W 时获得了 8.12 W 的连续波激光输出, 激光波长为 1.94 μm , 斜率效率为 52.1%, 光-光转换效率为 31.0%。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 抽运源采用二极管激光器 (FD-B0144, nLIGHT), 实际测得的最大输出功率为 26 W, 满功率运行时波长为 795 nm, 半峰全宽约为 2 nm, 其输出波长随工作温度变化的幅度约为

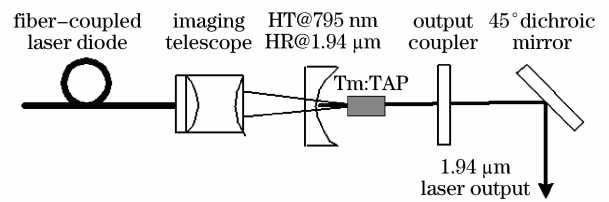


图 1 激光二极管抽运的 Tm:YAP 激光器装置图

Fig. 1 Setup of LD pumped Tm:YAP laser

0.3 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 采用光纤耦合方式输出, 光纤芯径为 200 μm , 数值孔径为 0.22。光纤输出的抽运光经过 1:2 的准直聚焦系统聚入激光晶体, 抽运直径约为 400 μm 。输入镜采用曲率半径为 250 mm 的平凹镜, 对 1.94 μm 反射率大于 99%, 对抽运光的透过率大于 97%。输出镜采用平面镜, 对 1.94 μm 激光的透过率为 10%。整个谐振腔的长度约为 28 mm。45 $^{\circ}$ 二色镜对 795 nm 透过率大于 95%, 对 1.94 μm 反射率大于 99%。激光工作物质采用 *c* 轴切割掺杂原子数分数为 3% 的 Tm:YAP 晶体, 晶体长度为 7 mm, 截面为 3 mm \times 3 mm, 激光晶体两端面经过严格的光学研磨, 并镀 795 nm 和 1940 nm 增透膜。晶体用钢铂包裹装入紫铜散热块中, 采用热电制冷的方式并用风冷进行散热, 晶体温度控制在 18 $^{\circ}\text{C}$, 温控精度为 $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果与分析

Tm:YAP 激光器属于准三能级系统, 其运转机制如图 2 所示, Tm³⁺H₆ 态粒子吸收波长为 795 nm 的抽运光后被激发到 Tm³⁺H₄ 态。Tm³⁺H₄ 态粒子向下辐射到 Tm³⁺F₄ 态, 产生的光子又同时将 Tm³⁺H₆ 态粒子激发跃迁到 Tm³⁺F₄ 态, 这样就产生了 2 个 Tm³⁺F₄ 态粒子, 这个交叉弛豫过程提高了 Tm 离子的量子效率。Tm³⁺F₄ 态向³H₆ 的跃迁就产生了 1.9 μm 激光。在实验中使用北京光学仪器厂生产的 WDG-30 型光栅单色仪 (使用前用 632.8 nm He-Ne 光校准) 测量了 Tm:YAP 激光器的波长, 在光栅单色仪的出射狭缝端放置 InGaAs 探测器, 它采集到的信号输入到 TDS-3032B 示波器中。驱动光栅单色仪, 读出与波长相对应的信号强度值, 然后描点即可得出激光光谱, 测量结果如图 3 所示。激光器输出中心波长为 1938.2 nm, 谱线半峰全宽约为 2.9 nm。

激光器的斜率效率表示为

$$\eta = \eta_a \eta_q \frac{T}{T+L} \frac{\nu_l}{\nu_p}, \quad (1)$$

式中, η_a 为抽运光的吸收效率, η_q 为 Tm 离子的量子效率, ν_l 为激光频率, ν_p 为抽运光频率, T 为输出

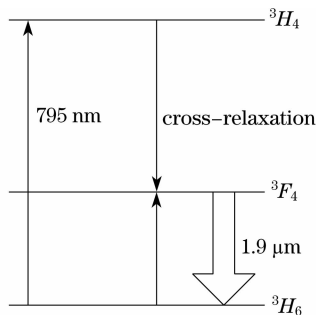


图 2 Tm : YAP 激光器的运转机制

Fig. 2 Schematic of the energy processes involved in Tm : YAP laser

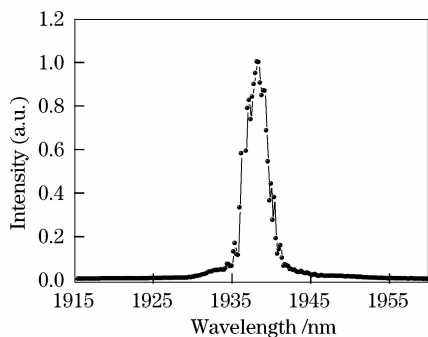


图 3 在 10% 透过率下 Tm : YAP 激光器的输出波长

Fig. 3 Output wavelength of Tm : YAP laser at transmittance of 10%

镜的透过率, L 为谐振腔内的往返损耗。在实验中测得 η_a 的值约为 86%, 根据晶体端面的反射以及谐振腔内镜片的传输损耗估计 L 值约为 3%, 根据文献[15] η_a 的理论值约为 1.76, 抽运波长为 795 nm, 激光波长为 1938 nm。据(1)式计算得 Tm : YAP 激光器的斜率效率为 60%。使用 Coherent PM30 功率计对激光器的输出功率进行测量, 结果如图 4 所示。当抽运功率为 26.2 W 时, Tm : YAP 激光器获得连续波最大输出功率为 8.12 W, 斜率效率为 52.1%, 相应的光-光转换效率为 31.0%, 阈值抽运功率为 4.67 W。利用(1)式可以计算出量子效率的值为 1.52, 比较接近理论值。从图 2 中可以看出, 在抽运功率较小时, 激光器的效率较低, 这是由抽运波长与 Tm : YAP 晶体的吸收波长不匹配引起的。由于激光二极管的输出波长随着输出功率的增加而发生红移, 而使用的激光二极管在满功率运行时的输出波长为 795 nm, 所以在小功率运行时其波长远离 Tm : YAP 晶体的吸收峰, 导致其对抽运光的吸收较低, 所以相应的效率也低。随着激光二极管输出功率的增加, 其波长逐渐靠近 795 nm, 激光器的效率也随之达到最佳。

在 14~26 °C 的范围内研究了晶体温度对激光

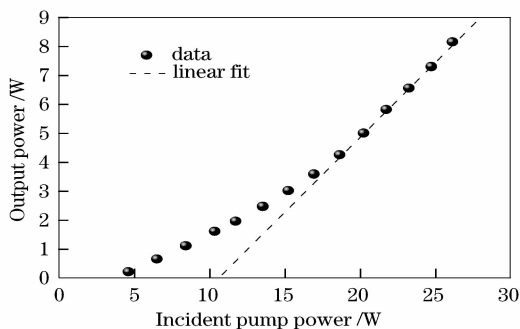


图 4 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power as a function of pump power

输出特性的影响。图 5 给出了抽运功率为 10.5 W 时, Tm : YAP 激光器输出功率随晶体温度的变化关系。从图中看出, 输出功率随晶体温度的升高而减小, 简单线性拟合可得输出功率的变化幅度约为 24 mW/°C。这是由于 Tm : YAP 晶体的激光能级是多重态 Stark 能级, 当晶体的温度升高时, 多重态 Stark 能级中激光上能级粒子数密度的数值随温度的增加而减小, 导致反转的粒子数降低, 激光器阈值升高, 效率降低, 进而导致激光器输出功率的下降。

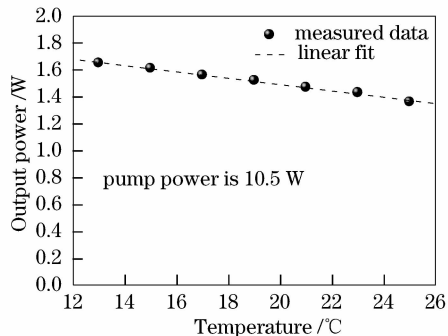


图 5 输出功率与晶体温度的变化关系

Fig. 5 Output power versus the crystal temperature

4 结 论

在常温条件下, 采用二极管激光器端面抽运 c 轴切割 Tm : YAP 晶体, 实现了 1.94 μm 激光的高效率输出。当激光器输出镜的透过率 T 为 10% 时, 获得了 8.12 W 连续波输出, 斜率效率为 52.1%, 光-光转换效率为 31.0%。用光栅单色仪测量 Tm : YAP 激光器的输出中心波长为 1938.2 nm, 谱线半峰全宽约为 2.9 nm。并测量了 Tm : YAP 激光器输出功率在室温范围内随温度的变化, 讨论了二者之间的关系。

参 考 文 献

- 1 J. R. Yu, U. N. Singh, N. P. Barnes *et al.*. An all solid-state 2- μm laser system for space coherent wind lidar [C]. *IEEE*

- Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**: 27~33
- 2 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. 10 W mid IR holmium pumped ZnGeP-OPO [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 1998, **19**: 226~229
 - 3 Wang Yuezhu, He Wanjun, Yao Baoquan *et al.*. Tm : Ho : GdVO₄ laser at 2 μm using laser-diode double-end pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (6): 730~733
王月珠, 贺万俊, 姚宝权等. 激光二极管双端面抽运 Tm : Ho : GdVO₄ 2 μm 激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 730~733
 - 4 Xinlu Zhang, Youlun Ju, Yuezhu Wang. Diode-pumped single frequency Tm, Ho : YLF laser at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8): 463~465
 - 5 Xiaoming Duan, Baoquan Yao, Yunjun Zhang *et al.*. Diode-pumped high efficient Tm : YLF laser at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 591~593
 - 6 E. C. Honea, R. J. Beach, S. B. Sutton *et al.*. 115-W Tm : YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(9): 1592~1600
 - 7 L. A. Pomeranz, P. A. Budni, M. L. Lemons *et al.*. Power scaling performance of Tm : YLF and Tm : YALO lasers [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 1999, **26**: 458~462
 - 8 H. Kalaycioglu, A. Sennaroglu, A. Kurt. Influence of doping concentration on the power performance of diode-pumped continuous-wave Tm³⁺ : YAlO₃ lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 667~673
 - 9 Li Cheng, Cao Yuhui, Liu Fuyun *et al.*. Spectra and laser properties of Tm : YAG crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1087~1091
李成, 曹余惠, 刘福云等. Tm : YAG 晶体的光谱及激光特性研究 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1087~1091
 - 10 Zhang Xiurong, Zhang Xinmin, Wu Guangzhao. Study of Tm : YAG crystal suitable for LD pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 15~17
张秀荣, 张新民, 吴光照. 适合 LD 抽运 Tm : YAG 的研究 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1): 15~17
 - 11 Li Cheng, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. Temperature induced spectral lines broadening and fluorescence quenching in Tm : YAG crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 243~248
李成, 霍玉晶, 何淑芳等. Tm : YAG 晶体光谱的温度特性及荧光的温度淬灭 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 243~248
 - 12 Yufeng Li, Baoquan Yao, Yuezhu Wang *et al.*. High efficient diode-pumped Tm : YAP laser at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 286~287
 - 13 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump Tm : YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 181~185
林志锋, 高明伟, 高春清. 激光二极管端面抽运 Tm : YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 181~185.
 - 14 R. C. Stoneman, L. Esterowitz. Efficient 1.94-μm Tm : YALO laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(1): 78~81
 - 15 M. Petros, J. Yu, U. N. Singh *et al.*. A 300-mJ diode pumped 1.9 μm Tm : YLF laser [C]. *SPIE*, 2002, **4484**: 17~24