

# 激光二极管抽运 Tm:YAP 晶体实验研究

韩 隆 魏 磊 吴军勇 郑 毅 陈军伟 王克强

(华北光电技术研究所固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 简要阐述  $2\ \mu\text{m}$  激光光源的广泛应用需求, 分析掺铥铝酸钇(Tm:YAP)晶体的能级结构和吸收光谱特性, 报道了采用激光二极管(LD)端面抽运 Tm:YAP 晶体的方式, 实现室温下  $2\ \mu\text{m}$  激光的高效输出。在激光二极管输出功率为 19 W 时,  $2\ \mu\text{m}$  连续激光输出功率为 6.5 W, 光光转换效率达 34%, 斜率效率为 47.5%。经过声光(AO)Q 开关进行调制后, 在重复频率 10 kHz 下, 获得 5.4 W 的动态激光输出, 激光单脉冲宽度为 70 ns, 激光二极管输出功率到  $2\ \mu\text{m}$  激光动态输出功率的转换效率为 28%, 斜率效率为 42%。通过实验验证了激光二极管端面抽运 Tm:YAP 晶体在室温下高效输出的特性。

**关键词** 激光器;  $2\ \mu\text{m}$  激光器; Tm:YAP; 激光二极管抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## Experimental Research of Laser Diode Pumped Tm:YAP

Han Long Wei Lei Wu Junyong Zheng Yi Chen Junwei Wang Keqiang

(National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The application of  $2\ \mu\text{m}$  laser source is introduced, and the energy level diagram and absorption spectrum of Tm:YAP crystal are analyzed. A laser diode end-pumped Tm:YAP laser is reported. A high efficient  $2\ \mu\text{m}$  laser is attained at room temperature. The CW output power is 6.5 W with the laser diode output power of 19 W, the optical-to-optical efficiency is up to 34% and the slope efficiency is 47.5%. While acoustic-optical (AO) Q-switch is working at modulation mode, the output power of  $2\ \mu\text{m}$  at the repetition of 10 kHz is 5.4 W, single pulse width is 70 ns, optical-to-optical efficiency is 28% and the slope efficiency is tested to be 42%.

**Key words** lasers;  $2\ \mu\text{m}$  laser; Tm:YAP; laser diode pumped

## 1 引 言

近年来,  $2\ \mu\text{m}$  波段室温运行的固体激光器由于在医学、光通信、遥感和雷达等方面显示出重要的应用前景而引起广泛的关注并已成为热点。在军事上,  $2\ \mu\text{m}$  激光对大气和烟雾的穿透能力强, 可用于激光测距和激光雷达等, 同时, 水分子的吸收峰在  $1.93\ \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>, 所以  $2\ \mu\text{m}$  波段激光<sup>[2,3]</sup> 对组织穿透深度浅, 对人眼安全, 并且可以通过光纤传输, 故该波段激光成为医疗上很好的外科手术光源。特别是目前对  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段激光源有着迫切的军事需求, 而为了实现整个  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段激光输出, 最有吸引力的方法是采用  $2\ \mu\text{m}$  激光作为抽运源, 以 ZnGeP<sub>2</sub> 等

晶体作为工作物质通过光学参量振荡(OPO)的方式实现中波激光输出<sup>[4,5]</sup>。因此在  $2\ \mu\text{m}$  波段开展技术研究有着十分重要的意义。

## 2 理论研究

现在用于产生  $2\ \mu\text{m}$  激光的晶体主要是以 YAG, YAP, YLF 为基质, 掺以 Ho, Tm, Er 激活离子的掺铥铝酸钇(Tm:YAP), Tm:YAG<sup>[6]</sup>, Tm, Ho:YLF<sup>[7]</sup> 等激光晶体。其中, Tm:YAP 以其优良输出特性受到人们的极大关注。YAP 基质为正交晶系结构, 具有各向异性的特点, 可以很好地抑制热致双折射引起的退偏损耗。Tm<sup>3+</sup> 离子为三能级结构,

但具有的交叉弛豫现象使 Tm:YAP 可获得较高的量子效率。此外, Tm:YAP 晶体还有掺杂浓度高、抽运吸收带宽大、发射截面大及荧光寿命长等优点, 适合于激光二极管(LD)抽运, 同时, Tm:YAP 与其他激光晶体相比具有偏振输出、阈值低、转换效率高优点, 可在室温条件下实现  $2\ \mu\text{m}$  波长的激光输出, 非常有利于激光器的小型化及实用化。

图 1 为  $\text{Tm}^{3+}$  在 YAP 晶体中的能级示意图<sup>[8]</sup>,  $\text{Tm}^{3+}$  能级结构具有交叉弛豫的特点, 一个  $^3H_6$  能级离子吸收一个抽运光子后, 可以产生两个  $^3F_4$  能级的粒子, 使得 Tm:YAP 有较高的量子效率, 有利于室温下实现激光输出。图 2 为室温下 Tm:YAP 晶体的非偏振吸收光谱<sup>[9]</sup>, 从图中可以看出晶体在位于 689.5 nm 和 795 nm 的两个吸收带最强, 由于 795 nm 与 GaAsAl/GaAs 激光二极管的发射谱(792~796 nm)有很多的重叠, 一般选用 792~796 nm 的激光二极管作为 Tm:YAP 晶体的抽运源, 可获得较高的激光转换效率。

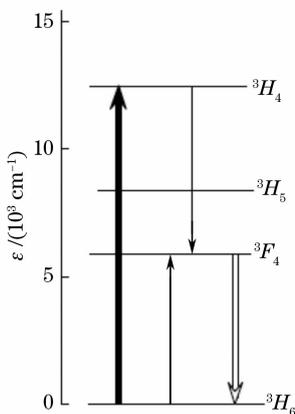


图1  $\text{Tm}^{3+}$  离子能级结构图

Fig. 1 Energy level diagram of the  $\text{Tm}^{3+}$  ion

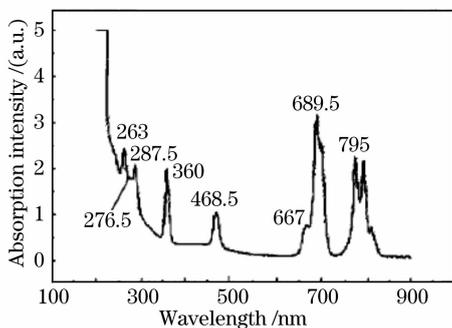


图 2 Tm:YAP 晶体吸收光谱特性

Fig. 2 Absorption spectrum of Tm:YAP

### 3 实验装置

实验采用激光二极管端面抽运 Tm:YAP 晶体

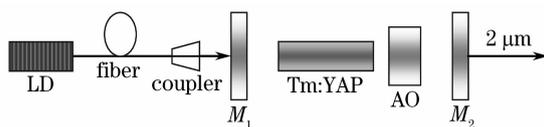


图 3 激光二极管抽运 Tm:YAP 结构示意图

Fig. 3 Structure of LD pumped Tm:YAP laser

的实验结构<sup>[10]</sup>, 如图 3 所示。由于 Tm:YAP 晶体在 795 nm 有较强的吸收峰, 抽运源选用输出波长范围在 792~796 nm 的激光二极管, 有利于提高晶体增益; 抽运光通过芯径  $600\ \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的传输光纤(Fiber)经光束耦合器(Coupler)注入 Tm:YAP 晶体, 光束耦合器的耦合比为 1:1.5, 增大抽运光光斑面积可以有效降低晶体的损伤, 输出焦点处的光斑约为  $900\ \mu\text{m}$ ;  $M_1$  为反射镜, 镀有  $2\ \mu\text{m}$  全反膜及 792~796 nm 增透膜; Tm:YAP 晶体尺寸为  $\phi 5\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ , 两端镀 792~796 nm 及  $2\ \mu\text{m}$  增透膜, 经实验测试, Tm:YAP 晶体对抽运光的吸收率大于 90%; AO 为  $2\ \mu\text{m}$  声光 Q 开关, 通光孔径为  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ , 在  $2\ \mu\text{m}$  波段透射率大于 99%, 衍射效率大于 50%;  $M_2$  为输出耦合镜, 镀有  $2\ \mu\text{m}$  的部分反射膜, 反射率为 80%;

## 4 实验结果及分析

### 4.1 Tm:YAP 晶体的温度特性

在 Tm:YAP 晶体中,  $\text{Tm}^{3+}$  有较高的量子效率, 并且具有输出功率对温度变化不敏感的特点, 易于实现室温下的激光输出, 图 4 为 Tm:YAP 晶体在不同控温点的输出功率特性曲线。

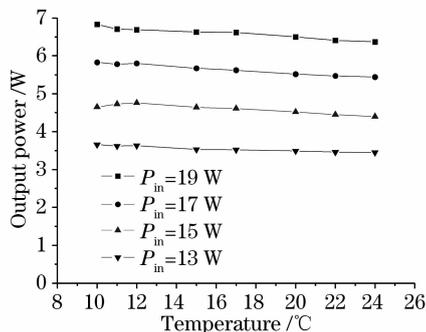


图 4 在激光二极管抽运功率一定情况下,  $2\ \mu\text{m}$  激光输出功率随 Tm:YAP 晶体控温点变化曲线

Fig. 4 Relationship between the output power of  $2\ \mu\text{m}$  laser and the temperature of Tm:YAP under constant pump power

由图 4 可以看出, 在抽运功率一定的条件下,  $2\ \mu\text{m}$  激光输出功率随 Tm:YAP 晶体控温点的上升略有下降, 但从数据分析得出, 在 Tm:YAP 晶体控

温点从10 ℃上升至 24 ℃的过程中,激光输出功率下降了约 6%,说明 Tm:YAP 晶体在温度较宽的范围变化时,输出功率的变化并不剧烈,这对激光器的室温运行提供了有利条件,考虑激光输出功率及温控系统功耗两方面因素,将 Tm:YAP 晶体温控点设置在室温 20 ℃,一方面对激光输出功率影响较少,同时,降低了温控系统的负载。

### 4.2 激光功率及效率

激光二极管端面抽运 Tm:YAP 晶体结构方案具有结构简单,光-光转换效率高的特点,图 5 为激光器输出特性图。

2 μm 激光输出阈值大约为 9 W,由图 5 可以看出,随着激光二极管输出功率的增加,2 μm 激光输出功率呈线性增长。在激光二极管输出功率 19 W 时,2 μm激光连续输出最大功率为 6.5 W,光光转换效率达 34%,斜率效率为 47.5%。通过声光 Q 开关进行调制后,可实现重复频率为 10 kHz 动态激光输出,最大输出功率为 5.4 W,相应的动静比为 83.1%,2 μm

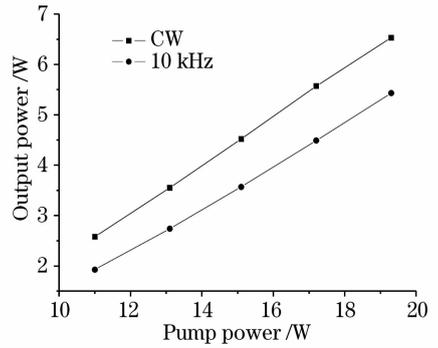


图 5 激光二极管抽运功率与 2 μm 激光输出功率的关系  
Fig. 5 Relationship between output power of 2 μm laser and LD pump power

激光输出功率仍与抽运源输出功率呈线性关系,光光转换效率为 28%,输出斜率效率 42%。

### 4.3 光束特性

图 6 为通过 SPIRICON 公司生产的光束分析仪测得的 2 μm 激光分布图。x 轴方向发散角为 9.3 mrad,y 轴方向发散角为 7.7 mrad。

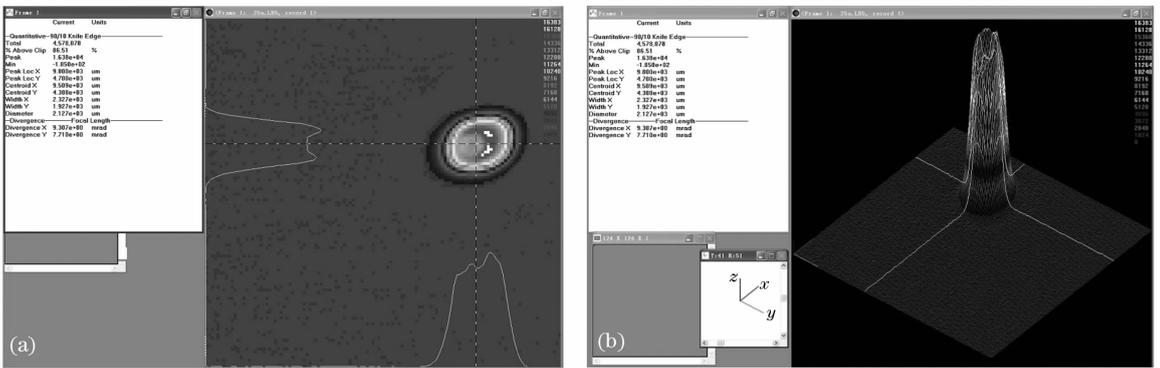


图 6 光斑分布图。(a) 二维图, (b) 三维图  
Fig. 6 Intensity distribution of laser beam. (a) 2D, (b) 3D

图 7 为声光调制后测得 2 μm 激光单脉冲的脉宽图,输出脉冲宽度为 70.9 ns,激光单脉冲能量为 0.54 mJ,单脉冲峰值功率 7.7 kW。

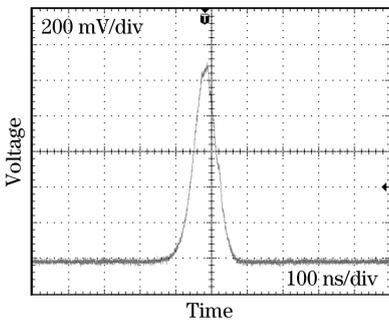


图 7 激光输出脉宽示意图

Fig. 7 Pulse width of output laser

## 5 结 论

对 Tm:YAP 晶体的能级特点及吸收光谱特性进行了理论研究,并通过实验研究,在室温条件下实现了 6.5 W 的 2 μm 连续激光输出及重复频率为 10 kHz、功率为 5.4 W 的 2 μm 动态激光输出,测得单脉冲宽度为 70.9 ns,动态光光转换效率为 28%,斜率效率为 42%。验证了 Tm:YAP 晶体功率输出对温度变化不敏感及高效率输出的特性,为进一步实现室温运行高功率 2 μm 激光源的研究提供了实验基础,同时激光二极管端面抽运 Tm:YAP 晶体激光器具有功耗低、结构设计简单的特点,有利于激光器的小型化、实用化,有广泛推广应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of 2  $\mu\text{m}$  all-solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 20~24  
赵媛媛,侯 霞,陈卫标. 2  $\mu\text{m}$  全固态激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 20~24
- 2 Wang Yuezhu, He Wanjun, Yao Baoquan *et al.*. Tm: Ho: GdVO<sub>4</sub> laser at 2  $\mu\text{m}$  using laser-diode double-end pumping[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 730~733  
王月珠,贺万骏,姚宝权等. 激光二极管双端面抽运 Tm: Ho: GdVO<sub>4</sub> 2  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 730~733
- 3 Yufeng Li, Baoquan Yao, Zhengguo Wang *et al.*. Tunable CW Tm, Ho: YLF laser at 2  $\mu\text{m}$ [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8): 470~471
- 4 Markus Henriksson, Mikael Tiihonen, Valdas Pasiskevicius. ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2  $\mu\text{m}$  source[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1878~1880
- 5 Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng *et al.*. Technical study of ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator pumped by a 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho: YLF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 39~42  
姚宝权,贺万骏,李玉峰等. 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho: YLF 激光抽运 ZnGeP<sub>2</sub> 光参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 39~42
- 6 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
- 7 Zhang Xingbao, Yao Baoquan, Wang Yuezhu *et al.*. LD pumped solid-state laser with high pulsed repetition rate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1449~1452  
张兴宝,姚宝权,王月珠等. 二极管抽运的 2  $\mu\text{m}$  高重复频率脉冲固体激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(10): 1449~1452
- 8 N. I. Borodin, P. V. Kryukov, A. V. Popov *et al.*. Diode-pumped CW Tm<sup>3+</sup>: YALO<sub>3</sub> laser[J]. *Quantum Electron.*, 2005, **35**(6): 511~514
- 9 Lu Yanling, Yang Yang, Wang Jun *et al.*. Spectral properties of Tm: YAP laser crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 968~972  
陆燕玲,杨 扬,王 俊等. Tm: YAP 激光晶体光谱参数的计算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 968~972
- 10 Yang Lin, Huang Weiling, Qiu Junlin *et al.*. Diode-end-pumped Nd: YAG 1.06  $\mu\text{m}$  CW ceramic laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 16~18  
杨 林,黄维玲,丘军林等. 激光二极管端面抽运的多晶 Nd: YAG 1.06  $\mu\text{m}$  连续激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 16~18