

激光二极管双端抽运 Tm:YAP 激光器

魏磊 胡学浩 韩隆 吴军勇 王克强

(华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要 简要分析了掺铥铝酸钇(Tm:YAP)晶体的能级结构及吸收光谱特性,报道了一种室温条件下的激光二极管(LD)双端面抽运 Tm:YAP 激光器。激光器输出的中心波长为 1996 nm,2 μm 连续激光输出功率为 40.7 W,光-光转换效率为 30.4%,斜率效率为 41.1%。经过声光(AO)调制后获得重复频率为 10 kHz 的脉冲激光输出,输出功率为 34.6 W,激光脉冲宽度为 92.08 ns,光-光转换效率为 25.9%,斜率效率为 32.9%。光束发散角 x 方向为 11.6 mrad, y 方向为 12.2 mrad。

关键词 激光器;2 μm ;激光二极管;双端面抽运;Tm:YAP 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502005

Laser Diode-Dual-End-Pumped Tm:YAP Laser

Wei Lei Hu Xuehao Han Long Wu Junyong Wang Keqiang

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

Abstract The energy level diagram and absorption spectrum of Tm:YAP crystal are analyzed, and Tm:YAP laser dual-end-pumped by laser diode is presented. The wavelength of laser is 1996 nm, the output power of 2 μm continuous wave laser is 40.7 W, the corresponding optical-to-optical efficiency is up to 30.4%, and the slope efficiency is 41.1%. While the acoustic-optical (AO) Q-switch is working at the repetition rate of 10 kHz, the average power is 34.6 W, the single pulse width is 92.08 ns, the corresponding optical-to-optical efficiency is 25.9%, and the slope efficiency is 32.9%. The divergence angles are 11.6 mrad (horizontal) and 12.2 mrad (vertical), respectively.

Key words lasers; 2 μm ; laser diode; dual-end-pumped; Tm:YAP crystal

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3540

1 引 言

自从 1965 年 Johnson 等^[1]采用掺钕钇铝石榴石(Ho:YAG)晶体为工作物质获得 2.01 μm 激光以来,人们逐渐对这个波段的激光器研究投以关注,特别是在获得了室温下运行的 2 μm 激光器之后,因其在激光雷达、遥感、医学、光通信等领域具有广泛的应用前景而更加成为研究的热点。在医学上,光纤传导的 2 μm 激光可用来做手术刀,由于 2 μm 波段激光对人眼安全,对人体组织穿透深度浅,手术精度高,因而逐渐比 1 μm 激光获得了更多的青睐^[2]。在环境监测上,2 μm 激光可用来测量大气中的水蒸气和 CO₂ 含量,用相干多普勒雷达测量风切

变和风速。在军事上,由于 2 μm 波段激光对大气和烟雾穿透能力强,因而用来做激光测距和激光雷达;此外,随着军用光电探测系统的红外探测波段覆盖到 3~5 μm 和 8~12 μm ,相应的干扰激光源需求愈加迫切,为了获得这些波段的激光输出,有效的办法就是以 2 μm 波段激光为抽运源,通过光参量振荡器(OPO)方式来实现^[3~5]。

近年来国内外在 2 μm 波段激光研究方面开展了很多工作^[6~12],尤其是在以掺 Tm、Ho 的铝酸钇(YAP)晶体为工作物质的 2 μm 激光器研究上取得了很多进展。2004 年,Sullivan 等^[6]报道了输出波长为 1940 nm 的激光二极管(LD)双端抽运 Tm:

收稿日期:2010-12-31;收到修改稿日期:2011-01-26

作者简介:魏磊(1983—),男,本科,助理工程师,主要从事激光二极管抽运固体激光器及光学参量振荡技术等方面的研究。E-mail: weilei2006@163.com

YAP 激光器, 输出功率为 50 W (连续)、45 W (40 kHz)。2005 年, Kalaycioglu 等^[7] 研究了掺杂原子数分数(1.5%~4%)对 Tm:YAP 激光器输出的影响, 并在原子数分数为 1.5% 的掺杂下实现了最大功率为 1.4 W (连续) 的 1.94 μm 激光输出。2010 年 Koranda 等^[8] 报道了波长为 1998 nm、最大输出功率为 5.5 W 的 Tm:YAP 激光器。国内的研究人员对 2 μm 激光器的研究近年来也不断取得进展, 2008 年韩隆等^[9] 报道了最大输出 6.5 W (连续) 的 LD 单端抽运 Tm:YAP 激光器。2009 年 Li 等^[10] 采用 Tm, Ho:YAP 为工作物质, 在 77 K 温度控制下获得了 6.17 W 的连续激光输出, 光-光转换效率为 28.8%, 斜率效率为 35.6%。同年, 王月珠等^[11] 报道了室温运行的激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器, 输出波长为 1.94 μm, 连续激光的最大输出功率为 8.12 W。

本文采用中心波长在 795 nm 的两个激光二极管(LD)作为抽运源, 以 *a* 轴切割(采用 *Pbnm* 空间群坐标)的 Tm:YAP 晶体为工作物质实现 1996 nm 激光输出, 选择合适的腔型, 获得的最大输出功率为 40.7 W (连续) 和 34.6 W (脉冲)。

2 实验装置

激光二极管双端面抽运 Tm:YAP 激光器的实验结构如图 1 所示^[13]。两个抽运源的工作参数基本相同: 最大输出功率均为 90 W (连续), 其输出波长随着工作温度以 0.3 nm/°C 的斜率变化, 变化范围在 793~796 nm, 这与 Tm:YAP 晶体在 794 nm 处的吸收峰相匹配。激光二极管的连续激光通过光纤耦合输出, 光纤芯径为 400 μm, 数值孔径(NA)为 0.22。光纤输出的抽运源通过耦合比为 1:2 的光束耦合器进行扩束整形, 扩束后的光束束腰直径约为 800 μm, 这两束光再分别通过平-平镜片 M₁ 和 M₂ 注入激光晶体。M₁ 和 M₂ 所镀膜层相同, 均为 792~796 nm 的增透膜(透射率 *T* > 95%) 和 2 μm 全反膜层(45°角入射)。Tm:YAP 晶体采用 *a* 轴切割, Tm³⁺ 的掺杂原子数分数为 3%, 晶体尺寸为 φ5 mm × 15 mm, 两端均镀有 793~796 nm 和 2 μm 的增透膜, 实验测得单端抽运(注入功率不大于 30 W)时晶体对抽运光的吸收效率不低于 92%。AO 为 2 μm 声光 Q 开关, 通光孔径为 3 mm × 3 mm, 对 2 μm 激光的透射率大于 99%, 射频功率控制在 70 W 左右, 衍射效率大于 50%。M₃ 为平凹镜, 镀有 2 μm 全反膜, 反射率大于 99%。输出镜 M₄

为平凹镜, 对 2 μm 激光的透射率为 12%。

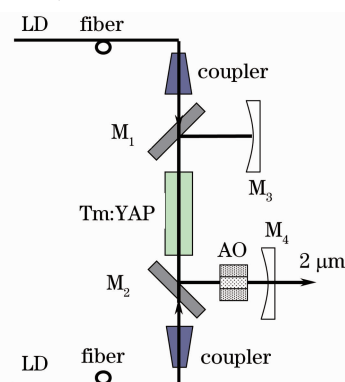


图 1 激光二极管双端面抽运 Tm:YAP 激光器结构

Fig. 1 Structure of LD dual-end-pumped Tm:YAP laser

对实验装置中的 Tm:YAP 晶体棒和 Q 开关晶体进行水冷方式的温度控制, 水流温度保持在 20 °C, 温控精度为 ±0.5 °C。Tm:YAP 晶体用厚度为 0.1 mm 的铝箔包裹, 然后用紫铜热沉封装, 热沉内部的水流通道采用微通道设计, 以尽量增大热沉的散热效率。

3 方案分析

3.1 Tm:YAP 的特性

与 Tm:YAG 和 Tm, Ho:YAP 晶体相比, Tm:YAP 晶体因其较好的物理化学性能尤其是室温运行和线偏振特性而被选为工作物质。YAP 基质在物理上具有硬度高、机械强度高、相对密度高等优点, 同时它的热导率较高, 晶体透射光波段较宽(0.2~5.9 μm), 折射率较大。Tm:YAP 晶体具有斜方晶系结构, 为光学负双轴晶体, 两光轴方向在 *ac* 平面上互成 70°角, 锐角等分线为 *c* 轴。Tm:YAP 晶体棒的切割轴向不同, 获得的输出波长也将不同, 选择 *a* 轴切割方式是为了获得相对较长的波长输出。

如图 2 所示, Tm³⁺ 为三能级系统^[14]。吸收了抽运光能量的 Tm³⁺ 从 ³H₆ 激发到 ³H₄, 然后经过自淬灭跃迁到亚稳态 ³F₄, 即激光的上能级。与此同时, 自淬灭后产生的光子能量被 ³H₆ 的 Tm³⁺ 吸收而跃迁至 ³F₄, 这个交叉弛豫过程使得 Tm:YAP 的量子效率接近于 2, 因而可以大大提高抽运光到 2 μm 激光的转换效率并降低阈值。不过, 交叉弛豫现象与 Tm³⁺ 的掺杂原子数分数有很大关系。因为淬灭过程缘于 Tm³⁺ 之间的离子相互作用所引发的能量转移, 所以, 如果 Tm³⁺ 掺杂原子数分数太低, 自淬灭跃迁后的交叉弛豫发生的几率大大降低。不过, 为防止出现重吸收效应, Tm³⁺ 的掺杂原子数分

数不能过高,掺杂原子数分数一般不应超过 12%。

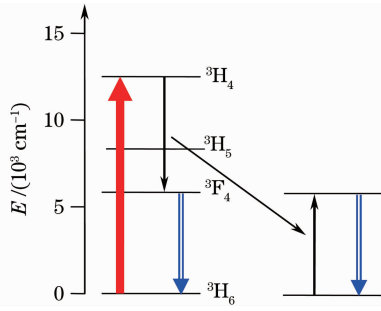


图 2 Tm³⁺ 在 YAP 中的能级结构及交叉弛豫

Fig. 2 Energy level diagram and cross relaxation of the Tm³⁺ ion in YAP

图 3 为 Tm:YAP 晶体的非偏振吸收谱线^[12], 其中值得关注的是 688 nm 和 794 nm 附近的吸收峰。虽然晶体在 688 nm 处的吸收系数相对更高一些,但是由于 794 nm 与 GaAsAl/GaAs 激光二极管的发射谱重叠较多,因此选用 794 nm 的激光抽运 Tm:YAP 晶体可以获得较高的激光转换效率。

3.2 谐振腔设计及分析

实验采用的 U 型谐振腔如图 4 所示。

激光晶体在高功率抽运光注入时产生不可忽视的热透镜效应,当晶体两端注入的抽运源功率基本一致时,可以假设热透镜中心与激光晶体中心重合。M₁ 与 M₂ 为反射镜, M₃ 与 M₄ 为端镜,曲率半径分别为 R₁、R₂、R₃ 和 R₄, M₁ 与 M₃ 间距为 L₁, M₁ 与热透镜间距为 L₂, M₂ 与热透镜间距为 L₃, M₂ 与

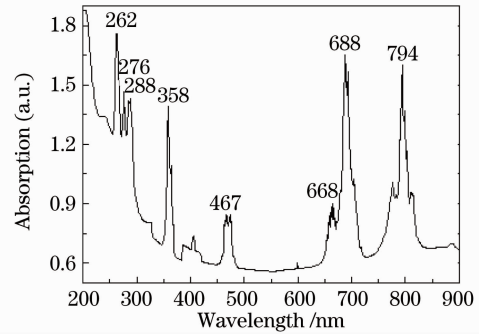


图 3 Tm:YAP 晶体的非偏振吸收光谱

Fig. 3 Unpolarized absorption spectrum of

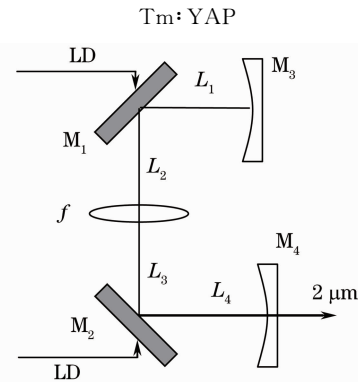


图 4 谐振腔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of resonator structure

M₄ 间距为 L₄, L₁、L₂、L₃ 和 L₄ 取值分别为 80、40 和 90 mm。根据 ABCD 传输矩阵理论,以 M₃ 的表面为起点的子午面往返矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1 \cos(\pi/2)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2 \cos(\pi/2)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2 \cos(\pi/2)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} 1 & \frac{L}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1 \cos(\pi/2)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_3} & 1 \end{bmatrix}$$

热透镜焦距在一级近似下等效于焦距为 f 的薄透镜^[15], $f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_p \eta_h} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha L)} \right]$ 。当

Tm³⁺ 的掺杂原子数分数为 3% 时,晶体的热传导系数 $K_c = 0.11 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{g} \cdot \text{cm})$,借助吸收光谱仪,得到 Tm:YAP 晶体对抽运光的吸收系数 $\alpha = 4.7 \text{ cm}^{-1}$,抽运光束束腰半径 $\omega_p = 400 \mu\text{m}$,激光晶体折

射率相对温度的变化率 $dn/dt = 9.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,抽运源在晶体中的产热效率 $\eta_h = 20\%$ 。晶体在通光方向的长度 $L = 15 \text{ mm}$,晶体对 $2 \mu\text{m}$ 光的折射率 $n = 1.94$ 。同时,为简化设计,将 M₁ 和 M₂ 反射镜均取为平面镜,即 $R_1 = R_2 = \infty$ 。谐振腔的稳定性条件为: $\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$ 。据此,当 L₁、L₂+L₃、L₄ 及 R₄ 确定时,谐振腔的稳定情况主要由注入的抽运光功率

和 M_3 的曲率半径 R_3 这两个因素决定。利用计算机画出了 $R_4=160$ mm 时的 $P-R_3$ 稳区图,如图 5 所示。由图可知,当 R_3 的值在 60~110 mm 范围内时,稳定区域的抽运光功率值起点在 60 W,较高的稳定阈值不利于最终获得高功率的稳定输出;而 R_3 在 60~110 mm 的稳定区域不仅存在阈值过高的问题,而且随着抽运功率的增加,稳定区域将被分割成两块。值得注意的是当 R_3 在 140~200 mm 内取值时,谐振腔的稳定区域覆盖整个抽运功率范围。从中取出 R_3 为 150、180、200 mm 3 个样本进行实验。

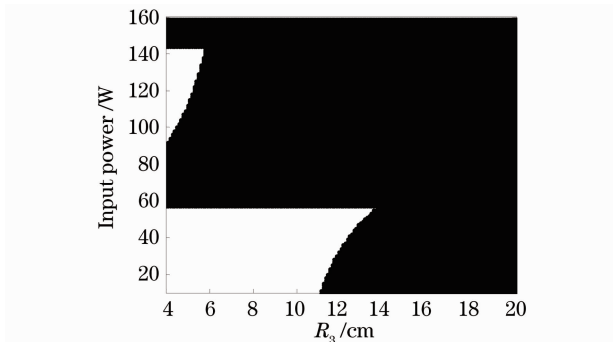


图 5 $P-R_3$ 稳区图

Fig. 5 Stable regions plot of $P-R_3$

4 实验结果及分析

4.1 激光功率和效率

R_3 为 150, 180, 200 mm 时的连续光输出如图 6 所示。 $2\ \mu\text{m}$ 连续激光输出的阈值约为 15 W, 两个抽运源向谐振腔内注入的抽运光功率始终保持同步增加。当 $R_3=150$ mm 时, 随着抽运光功率的逐渐增加, 输出光功率在 30.5 W 之前基本呈现线性增长, 然后随着注入功率的继续增加, 晶体热透镜效应变得严重, 斜率效率开始减小, 注入光的总功率高于 120 W 时, 输出光功率开始下降。当 $R_3=200$ mm

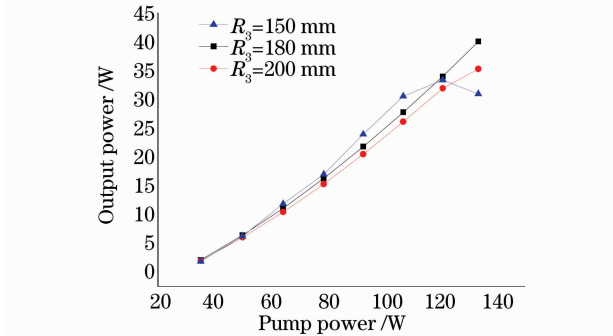


图 6 M_3 不同曲率值下的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出功率与抽运光功率的关系

Fig. 6 Output power as a function of pump power with different curvature values of M_3

时, $2\ \mu\text{m}$ 激光功率随着抽运光功率的增加呈线性增长趋势, 但由于高阶模式比 $R_3=150$ mm 的腔型要少, 因此效率和斜率效率均低于后者, 当注入功率超过 120 W 后, 斜率效率开始减小, 但并未出现功率饱和和下降现象。 R_3 取值为 180 mm 时, 随着总注入功率的增加, $2\ \mu\text{m}$ 连续激光输出功率呈现线性增长, 当两个抽运源注入总功率为 133.6 W 时, 获得了最大功率为 40.7 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 连续光输出, 相应的光-光转换效率为 30.4%, 斜率效率为 41.1%。

如图 7 所示, 在 $R_3=180$ mm 的腔型条件下, 对 $2\ \mu\text{m}$ 激光进行声光调制以获得重复频率为 10 kHz 的脉冲激光输出, 最大输出功率为 34.6 W, 动静比达 85%, 光-光转换效率为 25.9%, 斜率效率为 32.9%。

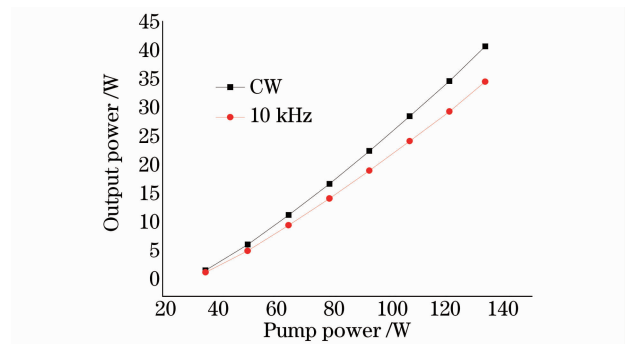


图 7 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出功率与激光二极管抽运功率的关系 ($R_3=180$ mm)

Fig. 7 Relationship between output power of $2\ \mu\text{m}$ laser and LD pump power ($R_3=180$ mm)

图 8 为 10 kHz 声光 Q 开关调制后的脉冲波形, 脉冲宽度为 92.08 ns, 激光单脉冲能量为 3.46 mJ, 单脉冲峰值功率为 37.6 kW。

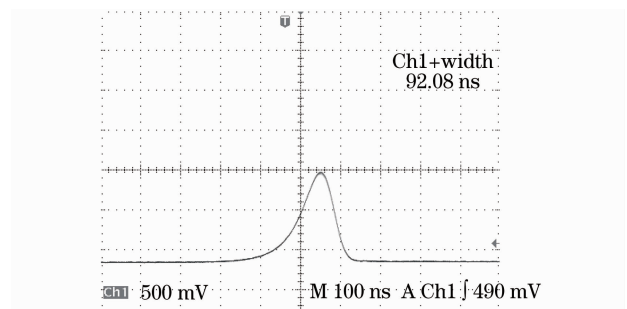


图 8 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出脉冲

Fig. 8 Pulse of $2\ \mu\text{m}$ laser

4.2 光 谱

实验中使用光栅单色仪测量了 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器的输出波长。单色仪出射狭缝端的探测器采集到的信号通过 10 kHz 的同步锁相放大, 经过扫描得出激光光谱, 如图 9 所示, 输出激光的中心波长为 1996 nm, 半峰全宽约为 5 nm。

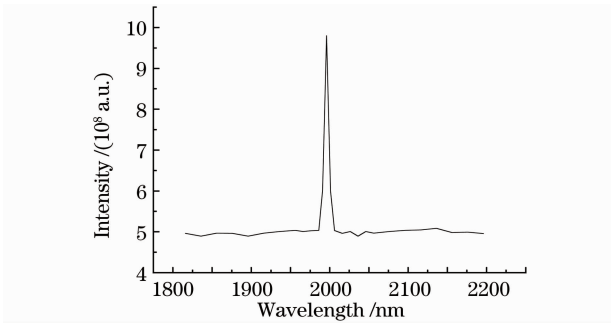


图9 Tm:YAP 激光器的输出波长

Fig. 9 Output wavelength of Tm:YAP laser

4.3 光束特征

使用 SPIRICON 公司生产的 CCD 光束分析仪对 $2\ \mu\text{m}$ 激光光斑进行观察, 获得图 10 所示的光斑分布二维图和三维图。采用聚焦透镜法测量光束的发散角, x 方向为 $11.6\ \text{mrad}$, y 方向为 $12.2\ \text{mrad}$, 光束质量为 $M_x^2 = 4.56$, $M_y^2 = 4.66$ 。

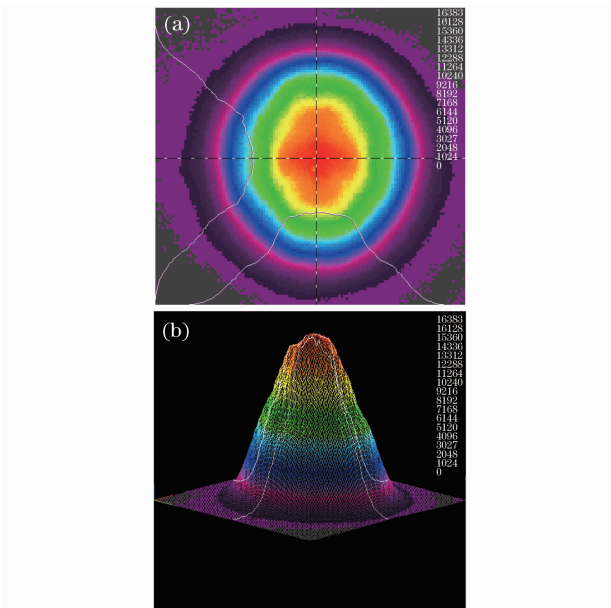


图 10 光斑分布图。(a)二维图,(b)三维图

Fig. 10 Intensity distribution of laser beam.

(a) 2D, (b) 3D

5 结 论

采用激光二极管双端面抽运 Tm:YAP 晶体棒的方案获得 $1996\ \text{nm}$ 的激光输出, 选择合适的谐振腔, 获得的最大输出功率(连续)为 $40.7\ \text{W}$, 相应的光-光转换效率为 30.4% , 斜率效率为 41.1% 。脉冲激光($10\ \text{kHz}$)最大输出功率为 $34.6\ \text{W}$, 光-光转换效率为 25.9% , 斜率效率为 32.9% 。鉴于 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光可以作为抽运源来实现中长波激光输出, 获得高效率、高功率的 $2\ \mu\text{m}$ 激光具有十分重要的

意义, 本方案为高效率、高功率中长波激光研究提供了一个有效的途径。

参 考 文 献

- L. F. Johnson, J. E. Geusic, L. G. Van Uitert. Coherent Oscillation from Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} and Er^{3+} ions in yttrium aluminum garnet[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**(5): 127~129
- 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
- P. B. Phua, B. S. Tan, K. S. Lai *et al.*. High-average-power mid-infrared ZrGeP_2 optical parametric oscillator with a wavelength-dependent polarization rotator[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(4): 489~491
- Alex Dergachev. $3.4\ \mu\text{m}$ ZGP RISTRA nanosecond optical parametric oscillator pumped by a $2.05\ \mu\text{m}$ Ho:YLF MOPA system[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14404~14413
- Wang Keqiang, Han Long, Wang Jianjun *et al.*. LD pumped intro-cavity OPO high repetition frequency $2\ \mu\text{m}$ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(z1): 185~188
- 王克强, 韩隆, 王建军 等. 二极管泵浦腔内 OPO 高重复频率 $2\ \mu\text{m}$ 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(z1): 185~188
- A. C. Sullivan, G. J. Wagner, D. Gwin *et al.*. High power Q-switched Tm:YAlO₃ lasers[C]. *Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Optical Society of America*, 2004, WA7
- Hamit Kalaycioglu, Alphan Sennaroglu, Adnan 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
- Petr Koranda, Jan Sulc, Maxim Doroshenko *et al.*. Cr:ZnSe laser pumped with Tm:YAP microchip laser[C]. *Solid State Lasers XIX: Technology and Devices*, 2010
- Han Long, Wei Lei, Wu Junyong *et al.*. Experimental research of laser diode pumped Tm:YAP[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 1~4
- 韩隆, 魏磊, 吴军勇 等. 激光二极管抽运 Tm:YAP 晶体实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 1~4
- L. J. Li, B. Q. Yao, Y. L. Ju *et al.*. 6.17-W continuous wave operation of a $2132\ \text{nm}$ c -cut Tm, Ho:YAP pumped by a laser diode of $794.3\ \text{nm}$ [J]. *Solid State and Liquid Lasers*, 2009, **19**(5): 943~946
- Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang *et al.*. Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1710~1713
- 王月珠, 段小明, 柯亮 等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1710~1713
- Qiao Liang, Hou Xia, Chen Weibiao. High pulse power $2\ \mu\text{m}$ ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1327~1331
- 乔亮, 侯霞, 陈卫标. 环形腔高脉冲能量 $2\ \mu\text{m}$ 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1327~1331
- Wu Zilu, Wang Xianhua, Chen Guofu *et al.*. Experimental study of mode matching of double-end-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 223~226
- 武自录, 王贤华, 陈国夫 等. 双端泵浦固体激光器模匹配问题的实验研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 223~226
- 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
- W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Sun Wen *et al.*. Transl. Beijing: Science Press, 2002. 363~365
- W. 克希耐尔. *固体激光工程*[J]. 孙文 等译. 北京: 科学出版社, 2002. 363~365