

基于扭转模腔的 L 形单纵模 T_m, Ho:YAG 激光器

李 莉¹, 鞠有伦², 戴通宇², 陈 方¹

¹ 洛阳光电设备研究所光电系统一部, 河南 洛阳 471009;

² 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 使用二极管抽运的 L 形扭转模腔实现了单纵模 T_m, Ho:YAG 激光器, 自由运行时输出光谱在 2090 nm 附近有两个主要的振荡波段, 当抽运功率达到 6.12 W 时, 最大输出功率为 483 mW。该单纵模激光器在 5.9 W 的抽运功率下, 在 2090.9 nm 处可产生 202 mW 的最大输出功率, 对应的抽运功率的斜率效率为 6.95%。当抽运功率提高到 5.9 W 以上时, T_m, Ho:YAG 激光器开始多模式运行。用刀口法测量了单纵模 T_m, Ho:YAG 激光器在几个位置的输出光束通过透镜后的半径。光束质量因子约为 1.17。

关键词 激光器; T_m, Ho:YAG; 扭转模腔; 二极管抽运; 单纵模

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081408

L-Shaped Single-Longitudinal-Mode T_m, Ho:YAG Lasers Based on Twisted Mode Cavity

Li Li¹, Ju Youlun², Dai Tongyu², Chen Fang¹

¹ *The First Department of Optical-Electro System, Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang, Henan 471009, China;*

² *National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*

Abstract A single-longitudinal-mode T_m, Ho:YAG laser is realized by using a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity. There mainly exist two oscillator wavebands at around 2090 nm in the output spectrum of T_m, Ho:YAG laser under free running. The maximum output power is 483 mW under pump power of 6.12 W. The single-longitudinal-mode laser possesses a maximum output power of 202 mW at 2090.9 nm under the pump power of 5.9 W, and the corresponding slope efficiency is 6.95%. When the pump power increases to over 5.9 W, the T_m, Ho:YAG laser runs with multi modes. The output beam radii of single-longitudinal-mode T_m, Ho:YAG laser are measured with knife-edge method at several positions after the beams pass through a lens. The beam quality factor is about 1.17.

Key words lasers; T_m, Ho:YAG; twisted mode cavity; diode pump; single longitudinal mode

OCIS codes 140.3480; 140.3570; 140.3580

1 引 言

2 μm 波段的单频固体激光器在高分辨率分子光谱、风测量和遥感^[1-3]等领域应用广泛。可作为相干多普勒激光雷达和差分吸收雷达发射源的高能量脉冲单频固态激光器, 需要单纵模 (SLM) 激光器生成种子光^[4-6]。

由于上能级寿命长和量子效率高等性能, T_m, Ho 共掺杂激光晶体在 2 μm 波段激光制备方面发挥着重要的作用^[7-10]。以工作在 780~800 nm 区域的二极管激光器 (LD)^[9-10] 作为 T_m, Ho 共掺杂激光器抽运源, 不同基质的 T_m, Ho 共掺杂激光器得到了广泛关注, 如 YLF (YLiF₄), YAP (YAlO₃), LLF (LuLiF₄) 和

收稿日期: 2017-04-05; 收到修改稿日期: 2017-05-23

作者简介: 李 莉 (1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电探测方面的研究。E-mail: eoei@vip.sina.com

YAG($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)^[11-15]。由于具有高机械强度和高导热性等优点, YAG 在大功率抽运下具有较高的损伤阈值^[16-19]。由于 YAG 的良好热力学性能, Tm-Ho 系统的高转换效率和成熟的抽运源等特点, Tm, Ho: YAG 晶体已经被广泛应用于生成 $2\ \mu\text{m}$ SLM 激光^[20-23]。微片激光器和腔内法布里-珀罗(F-P)标准具都是实现 Tm, Ho: YAG SLM 激光器的常用方法, 但是由于微片激光器增益介质的薄度和标准具的损耗, 因此很难获得高输出功率。Henderson 等^[24]报道了在 $-40\ ^\circ\text{C}$ 温度下二极管抽运的 Tm, Ho: YAG 激光器, 并通过插入两个未镀膜的法布里-珀罗标准具, 实现了最大功率为 58 mW 的 SLM 激光输出。He 等^[25]获得了二极管抽运 SLM Tm: YAG 和 Tm, Ho: YAG 激光器, Tm, Ho: YAG 微片激光器在 $-10\ ^\circ\text{C}$ 温度下获得 5 mW 的最大 SLM 输出功率。2009 年, Lin 等^[26]对 Cr, Tm, Ho: YAG 微片激光器进行了研究, 在 $10\ ^\circ\text{C}$ 的晶体温度下实现了 32 mW 的最大 SLM 输出功率。2012 年, Dai 等^[27]报道了使用两个 F-P 标准具的 Tm, Ho: YAG 激光器, SLM 激光输出功率为 60 mW。微片单纵模激光器增益介质长度较短, 故难以获得高功率激光输出。利用 F-P 标准具获得单纵模激光输出, 方法简单, 操作方便, 但同时也在激光器腔内引入了较大的损耗。利用标准具选单纵模主要是通过对腔内模式引入不同损耗, 进而通过选模获得单纵模输出。若追求高功率输出, 腔内功率密度也必然增加, 此时再通过损耗进行选模, 难度就会增大, 甚至会出现多模输出。除了输出功率受限外, 微片法与标准具法这两种方式都没有解决激光器多模输出的根本原因在于空间烧孔效应造成多模激光输出。扭转模腔(TMC)技术是获得高功率单纵模激光的有效途径之一, 旨在晶体两侧形成相向运行的、旋向不同的圆偏光。因为旋向不同的两个圆偏光相位差为 $\lambda/4$ (λ 为波长), 所以合成光强在某一时刻为一定值, 与空间位置无关, 这就消除了晶体上的光强不均匀性, 进而去除了空间烧孔效应, 实现了驻波腔的单纵模输出^[28]。

本文基于 TMC 技术利用二极管抽运 SLM Tm, Ho: YAG 激光, 获得了 202 mW 的最大 SLM 输出功率, 波长为 2090.9 nm, 对应的斜率效率为 6.95%。与已经报道的其他 SLM Tm, Ho: YAG 激光器相比, 使用 TMC 的 SLM Tm, Ho: YAG 激光器实现了更高的输出功率。

2 实验装置

L 型 Tm, Ho: YAG 激光器的基本谐振腔结构如图 1 所示。采用连续波光纤耦合最大功率为 10 W 的 785 nm 二极管激光器作为抽运源。抽运光束通过耦合系统(在 785 nm 处具有大于 99% 的透射率)聚焦到增益介质中, 在晶体的输入端面空间中光斑半径为 $320\ \mu\text{m}$ 。为了确保抽运光和腔内激光束之间的最佳模式匹配, 采用紧凑型平凹谐振腔, 其腔长为 105 mm。激光腔由输入镜、一对 $1/4$ 波片(波长为 $2.09\ \mu\text{m}$)、薄膜偏振器(TFP)和输出耦合器(OC)组成。M1 是镀有 $2.09\ \mu\text{m}$ 高反射率膜的输入镜, 并且对抽运波长具有高透射率。QWP1 和 QWP2 是在激光晶体两侧放置的一对未镀膜的 $1/4$ 波片。TFP 镀有对 p 偏振光束高透射和 $2.09\ \mu\text{m}$ 的 s 偏振光束高反射的膜层。F-P 是厚度为 0.1 mm 的未镀膜的 YAG 标准具。OC 是在激光波长处镀有 98% 反射率膜系的 100 mm 曲率半径的凹面输出镜。激光晶体包裹在钢箔中, 并通过热电冷却器固定在温度为 $10\ ^\circ\text{C}$ 的铜热沉中。Tm, Ho: YAG 晶体的长度和直径均为 3 mm, Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的掺杂浓度(原子数分数)分别为 6% 和 0.3%。

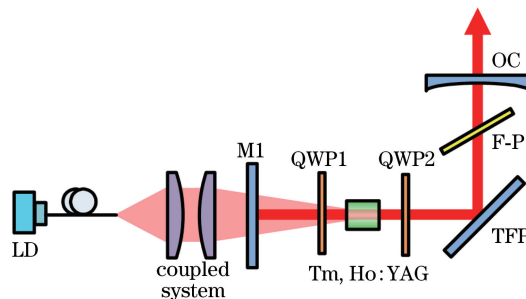


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 实验结果与讨论

图2为 Tm, Ho:YAG 激光器自由运行的输出光谱。输出激光的波长由美国 Bristol Instruments 公司的 721A 红外光谱分析仪记录。从图2可以看出,自由运行的 Tm, Ho:YAG 激光器的输出光谱在 2090 nm 左右有两个主要的振荡波段。通过 F-P 干涉仪测量 Tm, Ho:YAG 激光器的纵模,如图3所示,其自由光谱范围为 3.75 GHz。从图3可以看出,自由振荡的 Tm, Ho:YAG 激光器通常在多纵模下运行,模式间的竞争非常激烈。

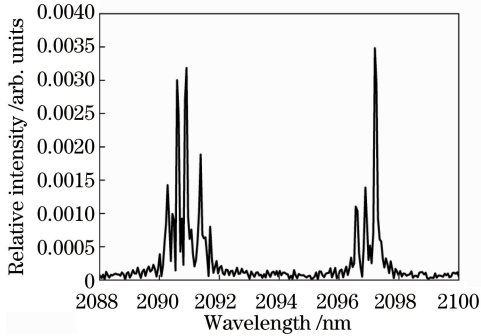


图2 Tm, Ho:YAG 激光器自由运行的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of Tm, Ho:YAG laser under free running

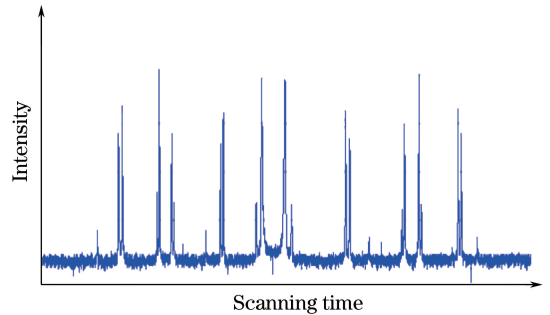


图3 自由运行 Tm, Ho:YAG 激光器的 F-P 光谱

Fig. 3 F-P spectrum of Tm, Ho:YAG laser under free running

为了抑制空间烧孔,将 QWP1 和 QWP2 插入并进行调整,以形成 SLM 激光。转动一对 1/4 波片,使快轴彼此垂直,并与 TFP 所确定的偏振方向成 45° 。一对 1/4 波片和 TFP 一起工作,可提供两个反向传播的正交圆偏振激光束,并在激光晶体中产生均匀的增益饱和,均匀能量密度可以抑制空间烧孔^[23]。尽管晶体中的空间烧孔已被抑制,但 Tm, Ho:YAG 激光器仍然在多模式下运行。将 F-P 插入空腔中,以进一步限制激光器中的振荡模式,并实现单纵模操作。图4所示为具有 2090.9 nm 单一波长的 Tm, Ho:YAG 激光器的输出光谱。F-P 干涉仪测得的 Tm, Ho:YAG 激光器的光谱如图5所示, Tm, Ho:YAG 激光器在单纵模下运行,没有观察到更高的透射模式。

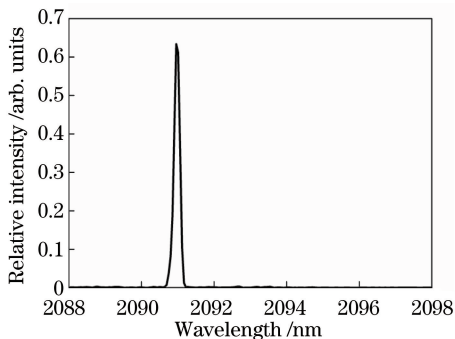


图4 具有 SLM 的 Tm, Ho:YAG 激光器的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of Tm, Ho:YAG laser with SLM

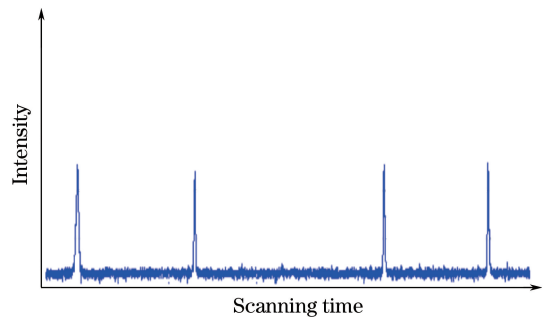


图5 具有 SLM 的 Tm, Ho:YAG 激光器的 F-P 光谱

Fig. 5 F-P spectrum of Tm, Ho:YAG laser with SLM

图6为与抽运功率相对应的多模和单纵模式运行的 TMC Tm, Ho:YAG 激光器的输出功率图。通过美国相干公司的 PM30 功率计和北京亚欧德鹏科技有限公司的 LPE-1A 功率计(分辨率限制在 0.1 mW, 最大功率为 2 W)分别测量抽运功率和激光器的输出功率。在自由运行情况下,当抽运功率达到 2.63 W 时,激光开始振荡。将抽运功率提高到阈值以上,输出功率几乎随着抽运功率的增加而线性增加,最大斜率效率为 13.96%。当抽运功率达到 6.12 W 时,最大输出功率为 483 mW,输出功率显示饱和效应。激光器在单纵模运行情况下也呈现出饱和效应。当抽运功率为 5.9 W 时,实现了波长为 2090.9 nm 的 202 mW 最大输出功率,拟合阈值抽运功率约为 3.13 W,对应斜率效率为 6.95%。将抽运功率提高到 5.9 W 以上时,由于热致双折射, Tm, Ho:YAG 激光器开始多模式运行,此时, TMC 结构可能会因双折射而破裂,从而导致多模振荡。

单纵模 Tm, Ho:YAG 激光束在最大输出功率下的光束特性如图7所示,光束横截面由德国 Spiricon 公

司的 Pyrocam I 热电相机拍摄。此外,用刀口法在几个位置测量了单纵模 $Tm, Ho:YAG$ 激光器的输出光束通过透镜后的半径。将获得的数据通过最小二乘法分析拟合到高斯光束传播方程中,以确定光束质量因子。光束质量因子计算结果为 1.17。

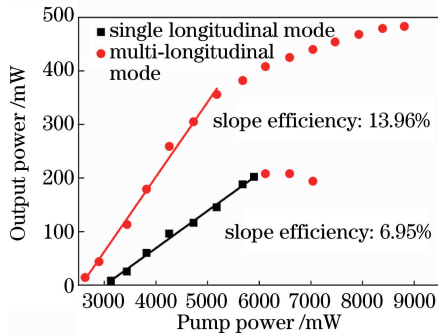


图 6 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 6 Output power versus pump power

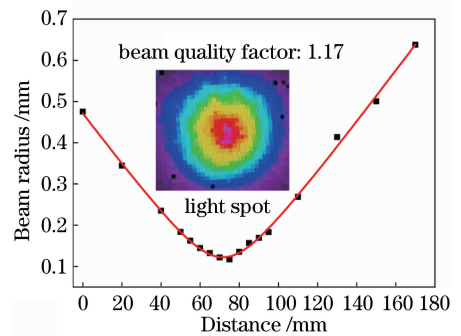


图 7 单纵模 $Tm, Ho:YAG$ 激光器的光束质量因子

Fig. 7 Beam quality factor of $Tm, Ho:YAG$ laser with SLM

4 结 论

实现了波长为 2090.9 nm 的 TMC $Tm, Ho:YAG$ 单纵模激光器。在 5.9 W 的抽运功率下获得 202 mW 的最大单纵模输出功率,对应斜率效率为 6.95%。在最大 SLM 输出功率条件下,测得光束质量因子为 1.17。2~3 μm 波段中的单纵模 $Tm, Ho:YAG$ 激光器可以用作相干多普勒激光雷达的种子光源。

参 考 文 献

- [1] Galli I, Bartalini S, Cancio P, *et al.* Mid-infrared frequency comb for broadband high precision and sensitivity molecular spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(17): 5050-5053.
- [2] Koch G J, Beyon J Y, Barnes B W, *et al.* High-energy 2 μm Doppler lidar for wind measurements[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(11): 116201.
- [3] Barria J B, Mammez D, Cadiou E, *et al.* Multispecies high-energy emitter for CO_2 , CH_4 , and H_2O monitoring in the 2 μm range[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(23): 6719-6722.
- [4] Wulfmeyer V, Bösenberg J. Single-mode operation of an injection-seeded alexandrite ring laser for application in water-vapor and temperature differential absorption lidar[J]. *Opt Lett*, 1996: 21(15): 1150-1152.
- [5] Wu C T, Chen F, Ju Y L. A diode-pumped actively Q-switched and injection-seeded $Tm:LuAG$ laser at room temperature[J]. *J Russ Laser Res*, 2014, 35(4): 347-354.
- [6] Dai T Y, Ju Y L, Duan X M, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of a resonantly pumped $Ho:YAlO_3$ laser at 2118 nm[J]. *Appl Phys B*, 2013, 111(1): 89-92.
- [7] Budni P A, Knights M G, Chicklis E P, *et al.* Performance of a diode-pumped high PRF $Tm, Ho:YLF$ laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(4): 1029-1032.
- [8] Fei B J, Guo W, Huang J Q, *et al.* Spectroscopic properties and energy transfers in Cr, Tm, Ho triple-doped $Y_3Al_5O_{12}$ transparent ceramics[J]. *Opt Mater Express*, 2013, 3(12): 2037-2044.
- [9] Liu Xu, Cheng Yong, Wan Qiang, *et al.* High temperature laser diode pumped all-solid-state laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0701003.
- [10] 刘旭,程勇,万强,等. 高温激光二极管抽运全固态激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701003.
- [11] 郭新军,蔡京辉,梁惊涛,等. 2 μm 波长红外风冷固体激光器首次实现 2 W 级平均功率单频基模输出[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1119001.
- [12] Han Long, Yuan Ligang, Chen Guo, *et al.* 26 W mid-infrared solid-state laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302004.
- [13] 韩隆,苑利钢,陈国,等. 26 W 中波红外固体激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302004.
- [14] Singh U N, Walsh B M, Yu J R, *et al.* Twenty years of Tm, Ho:YLF and LuLiF laser development for global wind

- and carbon dioxide active remote sensing[J]. *Opt Mater Express*, 2015, 5(4): 827-837.
- [13] Yao B Q, Chen F, Zhang C H, *et al.* Room temperature single-frequency output from a diode-pumped Tm, Ho:YAP laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1554-1556.
- [14] Zhang X L, Zhang S, Wang C Y, *et al.* Orthogonally polarized dual-wavelength single-longitudinal-mode Tm, Ho:LLF laser[J]. *Opt Express*, 2013, 21(19): 22699-22704.
- [15] Wang L, Cai X W, Yang J W, *et al.* 520 mJ langasite electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 1986-1988.
- [16] Buryy O A, Sugak D Y, Ubizskii S B, *et al.* The comparative analysis and optimization of the free-running Tm³⁺:YAP and Tm³⁺:YAG microlasers[J]. *Appl Phys B*, 2007, 88(3): 433-442.
- [17] Ju Y L, Wang Q, Wu C T, *et al.* Lasing characteristics of a single frequency Tm:YAG laser[J]. *Laser Phys*, 2010, 19(6): 1216-1219.
- [18] Cui Qingzhe, Wei Meng'en, Ling Lin, *et al.* Effect of water mist on threshold and damage of dentin ablation with Q-switched Er:YAG laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1201003.
崔庆哲, 魏蒙恩, 凌琳, 等. 水雾对调Q Er:YAG激光消融牙本质阈值及损伤的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201003.
- [19] Dong Jian, Liu Xuesheng, Si Hanying, *et al.* 350 mJ LD side-pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(11): 1101005.
董剑, 刘学胜, 司汉英, 等. 350 mJ LD侧面抽运Nd:YAG无水冷调Q激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101005.
- [20] Rothacher T, Luthy W, Weber H P. Spectral properties of a Tm, Ho:YAG laser in active mirror configuration[J]. *Appl Phys B*, 1998, 66(5): 543-546.
- [21] Mark E S, Wayne W R. Single-longitudinal-mode lasing of Ho: Tm:YAG at 2.091 μm [J]. *Appl Opt*, 1989, 28(23): 4965-4967.
- [22] Laporta P, Bava E, Svelto C, *et al.* Measurement and characterization of the frequency noise of a laser-diode-pumped single-frequency Tm-Ho:YAG laser[J]. *Opt Quant Electron*, 2000, 32(9): 1081-1095.
- [23] Laporta P, Marano M, Pallaro L, *et al.* Amplitude and frequency stabilization of a Tm-Ho:YAG laser for coherent lidar applications at 2.1 μm [J]. *Opt Laser Eng*, 2002, 37(5): 447-457.
- [24] Henderson S W, Hale C P. Tunable single-longitudinal-mode diode laser pumped Tm, Ho:YAG laser[J]. *Appl Opt*, 1990, 29(12): 1716-1718.
- [25] He C, Killinger D K. Dual-polarization modes and self-heterodyne noise in a single-frequency 2.1 microchip Ho, Tm:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(6): 396-398.
- [26] Lin Z, Gao C, Gao M Y, *et al.* Diode-pumped single-frequency microchip CTH:YAG lasers using different pump spot diameters[J]. *Appl Phys B*, 2009, 94(1): 81-84.
- [27] Dai T Y, Ju Y L, Yao B Q, *et al.* Single-frequency, Q-switched Ho:YAG laser at room temperature injection-seeded by two F-P etalons-restricted Tm, Ho:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 1850-1852.
- [28] Evtuhov V, Siegman A E. A twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. *Appl Opt*, 1965, 4(1): 142-143.