

## 2 $\mu\text{m}$ 波段 Tm:YAP 晶体半导体可饱和吸收镜连续波锁模激光器

张海鹏<sup>1</sup>, 黄继阳<sup>1</sup>, 周 城<sup>1</sup>, 夏 伟<sup>1</sup>, 何京良<sup>2</sup>

(1. 济南大学 物理科学与技术学院, 山东 济南 250022;  
2. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

**摘 要:** 使用半导体可饱和吸收镜, 实现了光纤耦合半导体激光抽运 Tm:YAP 晶体的全固态连续波锁模激光运转。根据 ABCD 矩阵理论设计激光器参数, 通过控制谐振腔的像散和模式分布, 获得了稳定的皮秒锁模激光输出。当最大抽运功率为 7.96 W 时, 获得锁模激光的最大平均输出功率为 0.73 W, 相应的斜效率为 15.6%。此时锁模脉冲宽度约为 1.7 ps, 对应的重复频率为 88.7 MHz, 中心谱线为 1 982.4 nm。结果表明: Tm:YAP 晶体是一种具有较好的热学、机械性能的 2  $\mu\text{m}$  波段超快激光晶体。

**关键词:** 半导体可饱和吸收镜; 连续波锁模; 皮秒脉冲; Tm:YAP 激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0505003

## CW mode-locked Tm:YAP laser with semiconductor saturable-absorber mirror at around 2 $\mu\text{m}$

Zhang Haikun<sup>1</sup>, Huang Jiyang<sup>1</sup>, Zhou Cheng<sup>1</sup>, Xia Wei<sup>1</sup>, He Jingliang<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China;  
2. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** A passively continuous-wave (CW) mode-locked Tm:YAP laser with a semiconductor saturable-absorber mirror was reported by using laser-diode as pump source. According to the ABCD matrix theory, the astigmatism and the stability in the cavity of the laser were theoretically analyzed. Stable continuous-wave mode-locked ps-pulses were achieved. The average output power of 0.73 W was obtained with the absorbed pump power of 7.96 W and the corresponding slope efficiency was 15.6%. The pulse duration was measured to be 1.7 ps with a repetition rate of 88.7 MHz at the central wavelength of 1 982.4 nm, and the corresponding slope efficiency was 15.6%. The results show that the Tm:YAP crystal has good thermal mechanical properties, which is very favorable for generating ultrashort pulses at around 2  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** semiconductor saturable-absorber mirror; CW mode-locked; ps-pulse; Tm:YAP laser

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家重点研发专项(2016YFB0401802); 山东省自然科学基金(ZR2017LF025); 济南大学博士基金

作者简介: 张海鹏(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光技术与器件方面的研究工作。Email: haikun\_zhang@163.com

## 0 引言

脉冲宽度在皮秒、飞秒量级的  $2\ \mu\text{m}$  波段锁模激光与许多气态污染物的特征吸收光谱相对应,并可以被水分子及其他生物组织强烈吸收,在医疗、大气监测、激光雷达、分子光谱和科学研究等领域具有重要应用<sup>[1-4]</sup>。主动锁模激光器需要在谐振腔内引入外部调制器,结构复杂,且稳定性易受外部环境的影响。随着半导体结构设计和制备工艺的日臻成熟,基于半导体饱和吸收镜(Semiconductor Saturable-Absorber Mirror, SESAM),的被动锁模激光器更受人们的关注<sup>[5-8]</sup>。特别是具有较窄脉冲宽度、较高平均输出功率的  $2\ \mu\text{m}$  波段锁模激光,可以满足生物组织的微加工、部分新型光子器件的制作需要,日益受到重视。

铝酸钇晶体的分子式为  $\text{YAIO}_3$  (缩写为 YAP),属于钇铝石榴石结构类晶体,具有自然双折射性质,输出光为线偏振光,是一种优秀的激光基质材料<sup>[9-11]</sup>。在  $2\ \mu\text{m}$  附近,Tm:YAP 晶体的受激发射截面大约是 Tm:YAG( $2.2 \times 10^{-21}\ \text{cm}^2$ )晶体的 2 倍<sup>[12]</sup>。此外,相比于 Tm:LiYF<sub>4</sub> 晶体、Tm:LiLuF<sub>4</sub> 晶体等氟化物晶体<sup>[13-15]</sup>,Tm:YAP 晶体的热导率高,物化性能稳定,可以获得大尺寸高质量晶体,在激光效率等方面具有优势。

文中采用激光二极管抽运 Tm:YAP 晶体,使用 SESAM 被动锁模元件,对输出  $2\ \mu\text{m}$  波段全固态连续波锁模激光进行研究。

## 1 实验装置

Tm:YAP 锁模激光实验装置如图 1 所示,采用 1.7 m 长的 Z 型折叠腔,将透过率 5% 的输出镜 OC 插入到 Z 型腔中并使光路进一步折叠,这时从 OC 输出两路性质相同的激光。输入镜 M1 和输出镜 OC 为平镜,腔镜 M2 和 M3 分别为曲率半径 500 mm 和 200 mm 的凹面镜,SESAM 放在 M3 的焦距附近兼做反射腔镜。M1、M2 和 M3 均镀 750~850 nm 减反、1 800~2 100 nm 高反的双色介质膜。SESAM (BATOP 公司,型号为 SAM-2000-2-10 ps)的饱和通量为  $70\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,调制深度为 1.2%,弛豫时间约 10 ps。采用中心波长为 790 nm 的光纤耦合半导体激光器为抽运源,耦合光纤芯径为  $400\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.22。采用掺杂浓度 3 at.% 沿 a 轴切割的 Tm:YAP 晶体为

激光增益介质,晶体尺寸为  $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 7\ \text{mm}$ ,两端镀  $2\ \mu\text{m}$  波段减反膜,并被铜箔包裹后放入紫铜块做成的水循环制冷夹具中,将该腔温度控制在  $18\ ^\circ\text{C}$ 。采用德国 APE 公司的 Pulse Check 150 自相关仪测量锁模脉冲宽度。

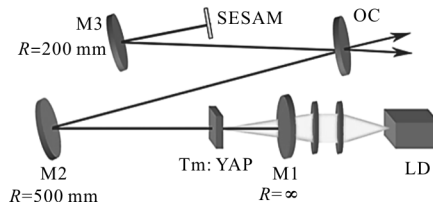


图 1 Tm:YAP 晶体 SESAM 连续波锁模激光器原理图  
Fig.1 Schematic of CW mode-locked Tm:YAP laser with SESAM

## 2 实验数据与分析

为了实现连续波锁模运转,实验中采用多种方法抑制调 Q 脉冲的发生,比如:通过增大谐振腔长度提高腔内的单脉冲能量,选取饱和通量小的 SESAM,减小激光在增益介质和 SESAM 上的光斑面积,等等。但是,SESAM 上的平均功率密度不能高于其破坏阈值,否则会造成 SESAM 的永久损伤,丧失可饱和吸收的作用。另外,如果腔内运转的光通量过高,远远超过 SESAM 的饱和通量,那么它的反射率不再依赖于入射光强,并产生脉冲分裂。根据 ABCD 传输矩阵理论可以计算出激光谐振腔内的腔模分布情况,M1 和晶体在起始位置,M2、M3 和 SESAM 等器件处的模式半径如图 2 所示。在晶体处,振荡光斑的模式半径为  $200\ \mu\text{m}$ ,与抽运光的模式匹配较好。在 SESAM 处,振荡光斑的半径约为  $50\ \mu\text{m}$ ,便于 SESAM 获得数倍于自身饱和通量的

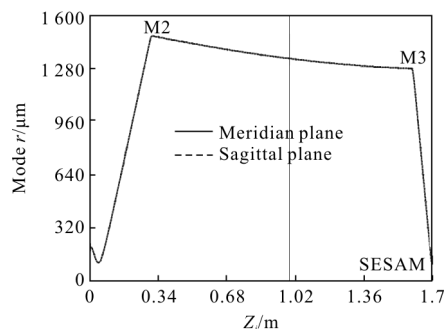


图 2 Tm:YAP 晶体 SESAM 连续波锁模激光器内的光束分布  
Fig.2 Distribution of the intracavity beam of CW mode-locked Tm:YAP laser with SESAM

能量密度并启动锁模。从图 2 中可以看出,代表子午面和弧矢面内模式分布的两条曲线高度重合,说明腔内的像散比较小。

当吸收抽运功率超过 2.76 W 时,激光开始振荡。随着抽运功率增加到 5.96 W,激光开始从调 Q 锁模运转模式进入连续波锁模运转模式,相应的输出功率为 0.5 W。当抽运功率增加到 7.96 W 时,获得锁模激光的最大平均输出功率为 0.73 W,相应的斜效率为 15.6%。由于输出镜光束分为两路,每路光束的平均功率大约为 365 mW。继续升高抽运功率,输出激光又进入调 Q 锁模状态。图 3 给出了激光器不同输出功率下的调 Q 锁模和连续波锁模的脉冲序列。图 4 给出了平均输出功率随吸收抽运功率的变化关系。图 4 左上角插图给出了连续波锁模激光的光谱,中心谱线为 1 982.4 nm,谱线宽度 3.9 nm,时间带宽积( $\tau \cdot \Delta\nu$ )为 0.51。

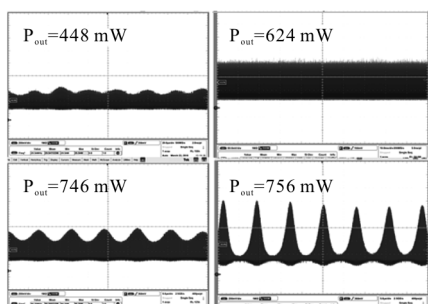


图 3 不同输出功率下 Tm:YAP 连续波锁模激光器的脉冲序列  
Fig.3 Pulse trains with different output power of CW mode-locked Tm:YAP laser

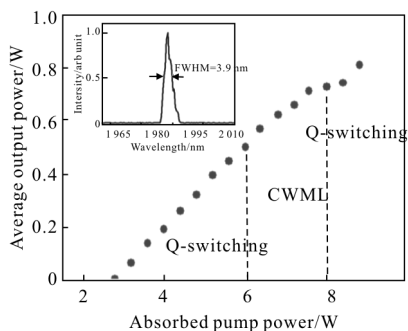


图 4 Tm:YAP 连续波锁模激光器的平均输出功率  
Fig.4 Average output power of CW mode-locked Tm:YAP laser

图 5 给出了较短时域下的锁模脉冲序列和自相关曲线。可以看出锁模脉冲的重复频率为 88.7 MHz,这与光束在腔内的往返时间相对应。利用自相关仪

提供的高斯近似下的计算公式得出脉冲宽度大约为 1.7 ps。实验发现,Tm:YAP 锁模激光器的稳定性很高,可持续数个小时,并且能够自启动。

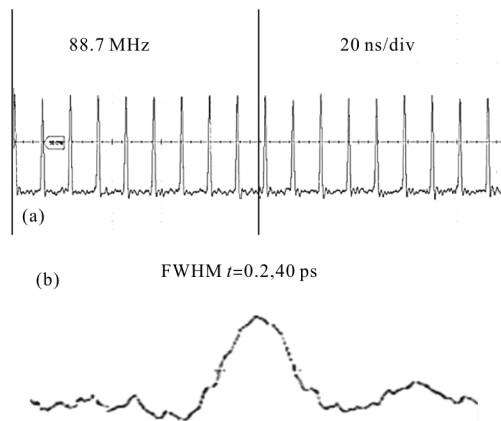


图 5 (a) Tm:YAP 连续波锁模激光器的脉冲序列,(b)自相关曲线  
Fig.5 (a) Pulse trains of the CWML Tm:YAP laser,  
(b) Autocorrelation trace

### 3 结 论

使用半导体可饱和吸收镜,采用 Tm:YAP 晶体,实现了 LD 抽运的 2  $\mu\text{m}$  波段全固态连续波锁模激光。设计了 Z 型折叠激光谐振腔,获得了稳定的皮秒锁模激光输出。吸收抽运功率超过 5.96 W 时,激光器便运转在连续波锁模状态。当最大抽运功率为 7.96 W 时,获得锁模激光的最大平均输出功率为 0.73 W,相应的斜效率为 15.6%。经自相关仪测量,锁模脉冲宽度约为 1.7 ps,重复频率为 88.7 MHz。结果表明,Tm:YAP 晶体是一种具有较好的热学、机械性能的 2  $\mu\text{m}$  波段超快激光晶体。

### 参 考 文 献:

[1] Li Chong, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Chinese Optics, 2016, 9(6): 615-624. (in Chinese)  
李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 615-624.

[2] Chen Yifeng, Yang Xiaoli. Study of detection of airborne lidar for windshear [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(Z2): 617-619. (in Chinese)  
陈一峰, 杨小丽. 机载激光雷达风切变探测研究 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(Z2): 617-619.

[3] Xu Jianqiu, Pan Yubai, Hang Yin. Recent progress in 2  $\mu\text{m}$

- wavelength ceramic lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3202-3208. (in Chinese)
- 徐剑秋, 潘裕柏, 杭寅. 2  $\mu\text{m}$  波段陶瓷激光器的进展[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3202-3208.
- [4] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 0065. (in Chinese)
- 曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. *中国光学*, 2016, 9(1):0065.
- [5] Wang Jiaxian, Zhuang Xinwei. Passive Q-switching and mode-locking in a flashlamp-pumped Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 584-588. (in Chinese)
- 王加贤, 庄鑫巍. 基于半导体可饱和吸收镜实现闪光灯抽运 Nd:YAG 激光器的被动调 Q 与锁模[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 584-588.
- [6] Luan C, Yang K, Zhao J, et al. Diode-pumped mode-locked Tm: LuAG laser at 2  $\mu\text{m}$  based on GaSb-SESAM [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 839-842.
- [7] Wang Y, Xie G, Xu X, et al. SESAM mode-locked Tm: CALGO laser at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(1): 131-136.
- [8] Chen Ping, Wei Di, Wu Benke, et al. Femtosecond laser precision machining of biodegradable heart sent. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 63-68. (in Chinese)
- 程萍, 位迪, 吴本科, 等. 可降解心脏支架的飞秒激光精密加工[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 63-68.
- [9] Cole B, Goldberg L. Highly efficient passively Q-switched Tm:YAP laser using a Cr:ZnS saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2259-2262.
- [10] Zhang H, He J, Wang Z, et al. Dual-wavelength, passively Q-switched Tm: YAP laser with black phosphorus saturable absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2328-2335.
- [11] Yao Baoquan, Li Xiaolei, Shi Hongwei, et al. Diode-pumped electro-optical cavity-dumped Tm:YAP laser at 1996.9 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10), 101402.
- [12] Jin L, Liu P, Liu X, et al. High average power of Q-switched Tm: YAG slab laser [J]. *Optics Communications*, 2016, 372(8): 241-244.
- [13] Cheng X, Zhang S, Xu J, et al. High-power diode-end-pumped Tm: LiLuF<sub>4</sub> slab lasers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14895-14901.
- [14] Aleshire C E, Charles X Y, Reed P A, et al. Efficient cryogenic near-infrared Tm:YLF laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13408-13413.
- [15] Loiko P, Serres J M, Mateos X, et al. Comparative spectroscopic and thermo-optic study of Tm:LiLnF<sub>4</sub> (Ln=Y, Gd, and Lu) crystals for highly-efficient microchip lasers at-2  $\mu\text{m}$  [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 844-854.