

测试、试验与仿真

室温 Tm:YLF 板条激光器实验研究

安朝卫, 关松

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 在室温条件下, 利用激光二极管双端抽运 Tm:YLF 板条激光器方案实现了 1 908 nm 的激光输出, 选择合适的泵浦光斑尺寸, 当晶体温度控制在 18 °C, 获得的最大连续输出功率为 60.1 W, 斜率效率为 39.8%, 通过采用 VBG 配合 0.3 mm F-P 的方法实现了波长的精细控制, 半峰值宽度约为 0.14 nm。

关键词: 体光栅; Tm:YLF; 半峰值宽度

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-04-0053-04

Experimental Research on Tm:YLF Slab Laser at Room Temperature

AN Chao-wei, GUAN Song

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: A 1 908 nm Tm:YLF slab laser pumped by two fiber coupled diode lasers at room temperature is reported. The suitable size of spot is chosen. The maximum continuous output power is 60.1 W at 18 °C, corresponding to the slope efficiency of 39.8%. The precise control of wavelength is achieved by adopting the method of volume body grating (VBG) with 0.3 mm F-P, corresponding to the full-width at half-maximum (FWHM) of 0.14 nm.

Key words: volume body grating (VBG); Tm:YLF; full-width at half-maximum (FWHM)

随着激光技术的进步, 近十年来 1.9 μm 激光器得到了迅猛发展, 目前 1.9 μm 激光器既可以为多种激光雷达、激光医疗仪器、工业加工设备和红外光电对抗系统等提供光源, 又可以作为中远红外激光器的高效泵浦光源。国内外的相关研究人员对高平均功率和高单脉冲能量的 1.9 μm 激光器相继展开了大量的研究工作, 取得了丰富的有应用价值的研究成果, 如表 1 所示。从这些研究进展可以看出, 掺 Tm 固体激光器可以产生连续功率较高的激光, 而调 Q 运转的掺 Tm 激光器研究较少, 主要因为 Tm 上能级寿命较短, 能量存储能力较差, 不适合做调 Q 激光输出。但作为连续波激光输出, 板条晶体相比于传统块状或棒状晶体能承受更高的泵浦功率, 而且热效应相对小得多, 非常适合于高功率的激光输出, 是 2 μm Ho 激光器较为理想的泵浦源。因此, 文中利用激光二极管(LD)作为抽运源对 Tm:YLF 板条

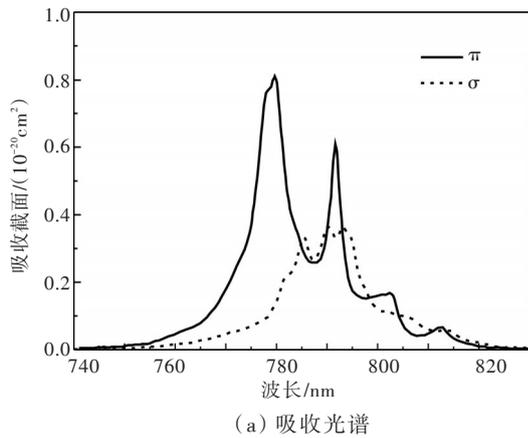
激光器开展了实验研究。

1 Tm:YLF 晶体物理及光谱特性

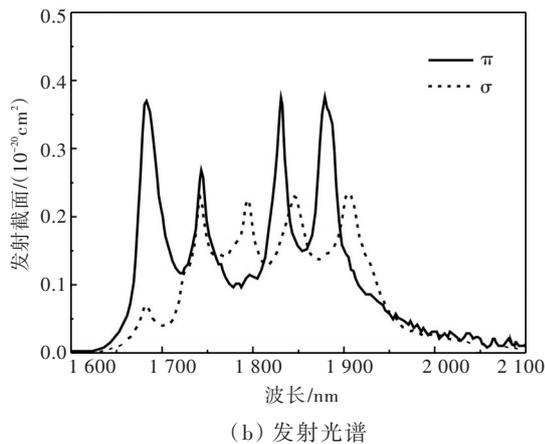
Tm:YLF 晶体是各项异性晶体, 属于四方晶系, 有两个不同轴向, a 轴(σ 偏振)和 c 轴(π 偏振), 所以有两种不同的吸收和发射谱线, 如图 1 所示。从吸收谱带上看, 无论是 a 轴晶体还是 c 轴晶体都对 792 nm 的光有较强的吸收, 且吸收谱带较宽, 所以 792 nm 的半导体激光器可以作为 Tm:YLF 晶体理想的泵浦源。由发射光谱可知, σ 偏振的 Tm 激光较大的发射截面位于 1 908 nm 附近, 而这恰好处于 Ho:YAG 晶体较大的吸收截面上, 而 π 偏振的 Tm 激光较大的发射截面位于 1 890 nm 附近, 恰好处于 Ho:YLF 晶体较大的吸收截面上, 所以两种偏振的 Tm 激光都可以作为单掺 Ho 激光器的理想泵浦源。

表1 1.9 μm 掺Tm固体激光器

研究人员	晶体	输出性能	输出波长	效率	工作温度
N P Barnes ^[1]	Tm:LuAG Rod	76 mW	2.023 8 μm	16.9%	常温
X Mateos ^[2]	Tm:LuVO4 Rod	564 mW	1 900 nm	7%	常温
P Koopmann ^[3]	Tm:Lu2O3 Rod	75 W	1 922~2 134 nm 可调谐	40%	常温
X Mateos ^[4]	Tm:KLu(WO4)2 Rod	4 W	1 800~1 987 nm 可调谐	69%	常温
M J D Esser ^[5]	Tm:GdVO4 Rod	8.7 W	1 818~1 915 nm 可调谐	28%	20 $^{\circ}\text{C}$
M Schellhorn ^[6]	Tm:YLF Slab	148 W	1 912 nm	32.6%	20 $^{\circ}\text{C}$
X Cheng ^[7]	Tm:YAP Slab	72 W	1 993 nm	37.9%	常温
J Li ^[8]	Tm:YLF Slab	200 W	1 890~1 908 nm 可调谐	52.2%	20 $^{\circ}\text{C}$
K S Lai ^[9]	Tm:YAG Rod	150 W	2 μm	-	-10 $^{\circ}\text{C}$
C Wang ^[10]	Tm:YAG Rod	267 W	2.07 μm	29.8%	8 $^{\circ}\text{C}$



(a) 吸收光谱



(b) 发射光谱

图1 Tm:YLF的吸收谱与发射谱

在实际使用中的Tm:YLF晶体由国内北京雷生强式科技有限公司提供,其基本参数如表2所示。每个晶体端面抛光处理使其严格平行,并镀上对792 nm附近的LD泵浦光和1.9 μm 附近的Tm激光都高透的介质薄膜。

表2 Tm:YLF晶体参数

晶体类型	Tm:YLF rod	Tm:YLF slab
横截面积 $a \times b / \text{mm}^2$	3×3	3×1.5, 6×1.5, 12×1.5
长度 c / mm	12	20
掺杂浓度	3.5%	2.5%
切割轴向	a	a
热导率 $K / \text{W} / (\text{cm} \times \text{K})$	0.06	0.06
泊松比 ν	0.3	0.3
热膨胀系数 $\gamma / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	13($//a$), 8($//c$)	13($//a$), 8($//c$)
杨氏模量 Y / GPa	85	85
泵浦光波长 / nm	792	790, 791
吸收系数 α / cm^{-1}	1.70(测量值)	1.15(测量值)
折射率	π :1.48, σ :1.46	π :1.48, σ :1.46
折射率梯度 $dn/dT / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	π :-4.3, σ :-2.0	π :-4.3, σ :-2.0

2 Tm激光器实验装置

实验中采用板条状Tm:YLF晶体,晶体浓度都为2.5 at.%,晶体温度通过带有制冷系统的去离子水循环控制在18 $^{\circ}\text{C}$ 。板条晶体上下两个宽表面包裹着一层薄的银箔并安装一个紫铜热沉上,与晶体上、下表面接触的热沉通过带有制冷系统的去离子水循环进行散热。为保证晶体产生的热量能够迅速与循环水进行热交换,循环水跟晶体之间的紫铜厚度设计为2 mm。此外,为了加快晶体和热沉之间的热交换速率,在板条Tm晶体两个宽的表面镀一层金属薄膜。

图2是单晶体板条 Tm:YLF 激光器的示意图。

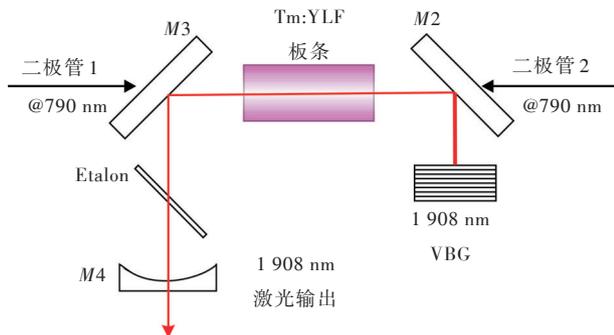


图2 连续波板条 Tm:YLF 单晶体激光器示意图

谐振腔输出镜为透过率 40%，曲率 200 mm 的平凹镜。泵浦方式都为双端面泵浦，通过体光栅 (VBG) 和腔内插入一片厚度为 0.3 mm 的 F-P 标准具的方法将输出波长限定在 1 908 nm。谐振腔总物理长度为 85 mm，不考虑热透镜效应利用高斯激光光束变换获得的腔内 TEM₀₀ 模束腰半径为 244 μm。Tm:YLF 激光器的泵浦源是输出功率 100 W 的 792 nm 光纤耦合输出的半导体激光器，尾纤芯径为 400 μm，其输出波长随电流的增加有轻微的红移，输出功率和波长与电流的关系如图 3 所示。

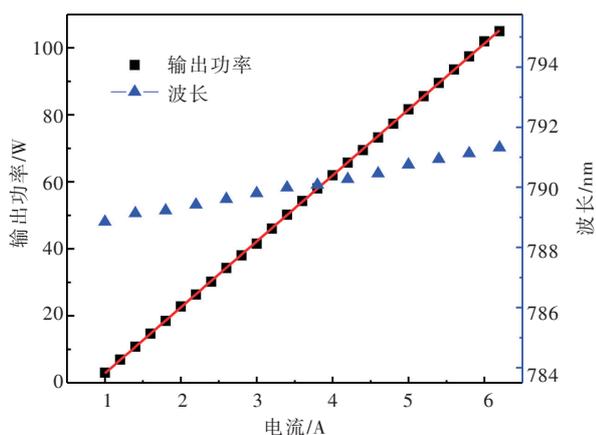


图3 LD输出功率和波长与电流的关系

为了能够向 Tm:YLF 激光器注入更高的泵浦功率，防止 Tm:YLF 晶体在较高的泵浦功率上吸收太强导致热积累，通过调节温度将半导体激光器的输出波长移动到 Tm:YLF 晶体吸收稍弱的 791nm 处。LD 到 Tm 晶体的泵浦耦合系统用一个聚焦透镜组， $f_1=15\text{ mm}$ ， $f_2=41\text{ mm}$ ，将半导体激光聚焦到 Tm 晶体

的 1/3 处，光斑半径约为 550 μm，泵浦光和振荡光的光斑比值约为 2.25。通过计算可知，泵浦光的瑞利长度约为 20.7 mm，稍大于 Tm 晶体的长度，对于双末端面泵浦的结构来说，较长的瑞利长度可以实现晶体内部比较均匀的泵浦分布。

3 输出性能与分析

用美国 Coherent 公司生产的 PM150 功率计(测量精度为 300 mW)测量 LD 和 Tm 激光器的输出功率。图 4 为 Tm:YLF 单晶体激光器的输出功率与 LD 泵浦功率的关系，晶体尺寸为 6×1.5×20 mm³。

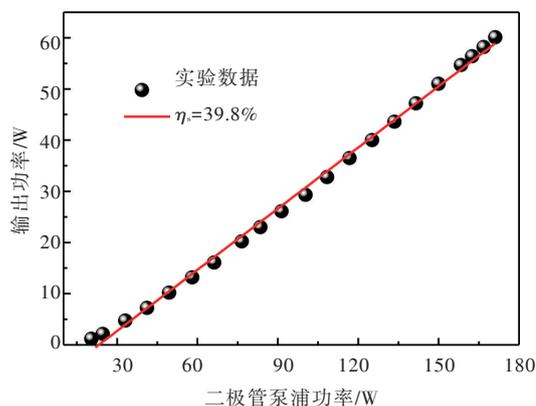


图4 板条状 Tm:YLF 单晶体激光器输出功率

阈值泵浦功率为 20.4 W，当泵浦功率为 171.1 W 时，Tm 激光的输出功率为 60.1 W，线性拟合得到激光器的斜率效率为 39.8%，光光转换效率为 35.1%。在晶体每个端面注入 85.5 W 的高功率下，晶体没有碎裂，此时晶体端面承受的平均功率密度约为 89.97 W/mm²。

实验中用美国 Bristol Instruments 公司生产的 621A-IR 型号的波长计测量激光器的输出波长，测量范围 1.3~5.0 μm，绝对测量精度为 ±0.2 ppm，最高输出功率下其输出波长处于 1 908.0 nm，如图 5 所示。半峰值宽度约为 0.14 nm。通过波长计实时观测，从阈值泵浦功率到最大泵浦功率，Tm 激光的输出波长红移了不到 0.2 nm，说明设计的谐振腔很好实现了激光波长的稳定输出。

此单板条 Tm 激光器的泵浦光斑是块状 Tm 激光器的 1.37 倍，从效率和输出波长稳定性方面来看，增大泵浦光斑没有造成效率的较大损失与波长

控制不稳定的现象。

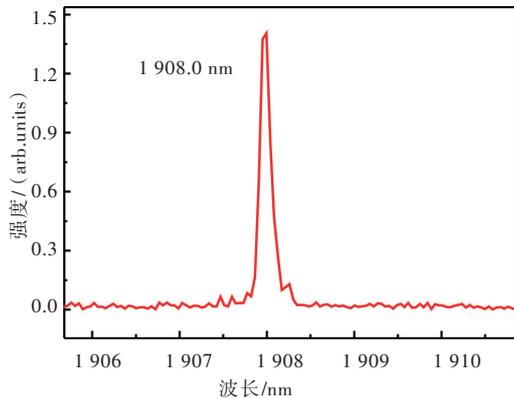


图5 板条状单晶体 Tm:YLF 激光器输出波长

4 结论

在室温条件下,利用激光二极管双端抽运 Tm:YLF 板条激光器方案实现了 1 908 nm 的激光输出,选择合适的泵浦光斑尺寸,当晶体温度控制在 18 ℃,获得的最大连续输出功率为 60.1 W 的,斜率效率为 39.8%,通过采用 VBG 配合 0.3 mm F-P 的方法实现了波长的精细控制,半峰值宽度约为 0.14 nm,随着输出功率的增加,波长只有 0.2 nm 的小幅度漂移,为获得高效率、高功率的 2 μm 激光提供了有效的途径。

参考文献

- [1] Barnes N P, Jani M G, Hutcheson R L. Diode-pumped, room-temperature Tm:LuAG laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4290-4294.
- [2] Mateos X, Liu J, Zhang H, et al. Continuous-wave and tunable laser operation of Tm:LuVO₄ near 1.9 μm under Ti:sapphire and diode laser pumping[J]. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials*, 2006, 203(4): R19-R21.
- [3] Koopmann P, Lamrini S, Scholle K, et al. Efficient diode-pumped laser operation of Tm:Lu₂O₃ around 2 μm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 948-950.
- [4] Mateos X, Petrov V, Liu J, et al. Efficient 2-μm continuous-wave laser oscillation of Tm³⁺:KLu(WO₄)₂[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(10): 1008-1015.
- [5] Esser M J D, Preussler D, Bernhardt E H, et al. Diode-end-pumped Tm:GdVO₄ laser operating at 1818 and 1915 nm [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97: 351-356.
- [6] Schellhorn M, Ngcobo S, Bollig C. High-power diode-pumped Tm:YLF slab laser[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94: 195-198.
- [7] Cheng X, Xu J, Hang Y, et al. High-power diode-end-pumped Tm:YAP and Tm:YLF slab lasers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 091406.
- [8] Li J, Yang S H, Meissner A, et al. A 200 W innoslab Tm:YLF laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10: 055002.
- [9] Lai K S, Xie W J, Wu R F, et al. A 150 W 2-micron diode-pumped Tm:YAG laser[C]// *Proc. of ASSL*, 2002: 535-539.
- [10] Wang C, Niu Y, Du S, et al. High-power diode-side-pumped rod Tm:YAG laser at 2.07 μm[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(31): 7494-7497.
- [5] 刘京郊. 光电对抗技术与系统[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2004.
- [6] 李铸澎,孙芮,金光勇. LD端面抽运 1.3 μm 双波长激光器研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(4): 1-3.
- [7] 王超,金光勇,梁伟,等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 小型无水冷却激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S1): 67-70.
- [8] 唐刚锋,沈兆国,尚旭川,等. 用液态金属传热的小型大功率全固态 Nd:YAG 板条激光器[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 680-685.
- [9] Wang W, Fu C. Segment side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Applied Opt*, 2012, 51(11): 1765-1770.
- [10] Wang W, Gong M L. Segmented circular LD arrays side-pumped a Nd:YAG laser rod[J]. *Laser Physics*, 2010, 20(6): 1344-1349.
- [11] Wang W, Gong M L. Efficient high-output diode side-pumped electro-optical Q-switched Nd:YAG/KGd(WO₄)₂ Raman laser with conductive and air cooling[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(4): 294-297.
- [12] Wang W, Gong M L. Diode-pumped Q-switched Nd:YAG-KGW Raman laser operating in two-color modulation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2655-2661.

(上接第 21 页)