

# LD 抽运 Cr, Tm, Ho:YAG 微片激光器单纵模运转特性的研究\*

林志锋 张云山 高春清† 高明伟

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

(2008 年 7 月 16 日收到, 2008 年 8 月 18 日收到修改稿)

研究了 LD 抽运的单纵模 Cr, Tm, Ho:YAG 微片激光器, 激光器厚度为 1 mm, 在用波长 785 nm 的 LD 进行端面抽运时, 激光器阈值为 1060 mW, 单纵模激光最大输出功率为 31 mW. 对激光器输出功率随温度变化特性进行了研究, 验证了 CTH:YAG 晶体的温度敏感性. 还研究了激光器的温度调谐特性, 实验测得激光器的温度调谐系数为 1.4 GHz/°C.

关键词: 激光光学, CTH:YAG 微片激光器, LD 抽运, 单纵模运转

PACC: 4255, 4260

## 1. 引 言

近年来 2 μm 波段室温运行的固体激光器在激光医疗、激光遥感、激光测距、激光雷达等方面显示了重要的应用价值, 引起了人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>. 其中的多数应用场合, 如激光雷达和高精度光谱分析, 都要求一个可调谐的单纵模 2 μm 激光光源<sup>[6]</sup>. 目前实现 2 μm 单纵模激光运转的方案中, 微片激光器具有结构简单、体积小、成本低等特点, 是优选方案之一<sup>[7,8]</sup>.

国际上已有了一些关于 LD 抽运的 2 μm 微片激光器研究报道. 在 Tm 掺杂晶体方面, 1998 年 Heine 等人通过在 700 μm 厚度的 Tm:YAG 微片后增加一个标准具进行反馈控制, 在晶体温度 15°C 时实现了 65 mW 单纵模输出, 激光线宽优于 1.5 MHz/2 ms<sup>[9]</sup>; 2001 年, Bourdet 等人采用 1 mm 厚度的 Tm:YVO<sub>4</sub> 微片获得了 62 mW 单纵模激光输出, 测量得到激光器的温度调谐系数为 1.9 GHz/°C<sup>[10]</sup>. 在 Tm, Ho 掺杂晶体方面, 1994 年 He 等人采用平凸形的 Tm, Ho:YAG 微片, 其中心厚度 1 mm, 输出透过率 2%, 晶体温度控制在 -10°C 时获得了 5 mW 的单纵模输出, 通过自拍频测得线宽约为 12 MHz<sup>[7]</sup>. 2001 年 Nagasawa 等

人采用 0.9 mm 厚的 Tm, Ho:YLF 微片, 在输出透过率 1%、晶体温度 20°C 时获得 11 mW 单纵模激光运转<sup>[8]</sup>. 姚宝权等人研究了 2.5 mm 厚的 Tm, Ho:YLF 微片激光器, 但并未产生 2 μm 单纵模激光运转<sup>[11]</sup>.

在各种 2 μm 激光晶体中, Cr, Tm, Ho:YAG (CTH:YAG) 激光晶体是较容易生长的一类激光晶体, 且容易获得较大尺寸. 人们近年来对于闪光灯抽运的 CTH:YAG 激光器进行了深入研究, 获得了较大能量的 2 μm 波段激光输出. 但长期以来人们对于采用 LD 抽运的 CTH:YAG 激光器的研究不多, 更未见 LD 抽运 CTH:YAG 激光器产生单纵模运转的实验结果报道.

本文报道了 LD 抽运 CTH:YAG 微片激光器在接近室温的情况下实现 2 μm 波段单纵模输出的实验结果, 采用的抽运源为波长为 785 nm 的 LD, 在晶体温度 10°C 时获得了 31 mW 的单纵模激光输出. 本文还测试了 CTH 晶体激光输出功率随温度变化的曲线、激光在不同模式下的激光光谱, 以及 CTH 激光器频率的温度调谐系数. 本文的研究结果为大量能量的 CTH:YAG 激光器的注入锁定提供了一种新的单纵模种籽源.

\* 国家自然科学基金(批准号 60478046)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gao@bit.edu.cn

## 2. 晶体光谱特性

CTH:YAG 晶体的简化能级示意图如图 1 所示,其中  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Tm}^{3+}$  为感光离子,  $\text{Ho}^{3+}$  为激活离子<sup>[12]</sup>. 人们通常采用闪光灯对 CTH:YAG 晶体进行抽运. 在闪光灯抽运下,  $\text{Cr}^{3+}$  离子吸收抽运产生  $^4A_2$  到  $^4T_1$  和  $^4T_2$  的跃迁, 经快速无辐射弛豫到  $^2E$  态, 然后能量通过偶极子相互作用从  $\text{Cr}^{3+}$  的  $^2E$  态无辐射转移到  $\text{Tm}^{3+}$ , 使  $\text{Tm}^{3+}$  从基态跃迁到  $^3H_4$  态.  $^3H_4$  态的  $\text{Tm}^{3+}$  离子通过交叉弛豫跃迁到  $^3F_4$  能级, 该能级具有较长的荧光寿命, 容易通过共振转移把能量转移给  $\text{Ho}^{3+}$ , 使  $\text{Ho}^{3+}$  从基态跃迁到  $^5I_7$  态, 从而  $^5I_7$  到  $^5I_8$  的跃迁产生激光<sup>[12]</sup>. 而如果采用 690 nm 或 785 nm 附近的 LD 抽运, 则可直接使  $\text{Tm}^{3+}$  离子产生基态到  $^3F_4$  的跃迁, 从而把能量转移给  $\text{Ho}^{3+}$  离子产生激光. 可以特别指出的是, CTH:YAG 晶体在 785 nm 附近有约 4 nm 的吸收带宽, 而目前 785 nm 附近的大功率 LD 生长技术已经日趋成熟, 因此采用 785 nm LD 抽运 CTH:YAG 产生  $2.09 \mu\text{m}$  激光成为可能.

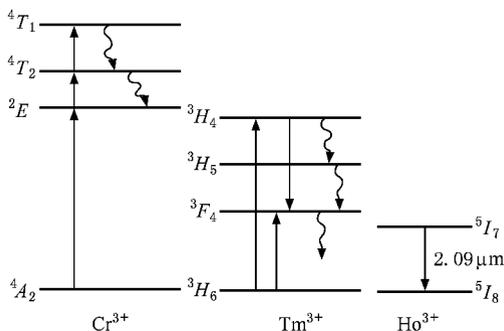


图 1 CTH:YAG 晶体简化能级

## 3. 实验装置和实验结果

LD 抽运单纵模 CTH:YAG 激光器的实验装置如图 2 所示. 实验中采用的 CTH:YAG 晶体的掺杂浓度是  $\text{Cr}^{3+}$  0.85at%,  $\text{Tm}^{3+}$  5.9at%,  $\text{Ho}^{3+}$  0.36at%. 晶体通光尺寸为  $\varnothing 4 \text{ mm}$ , 厚度为 1 mm. CTH:YAG 微片的前后两个端面抛光, 形成微片激光腔, 其纵模间隔为 83.3 GHz (或 1.21 nm). 晶体前表面镀  $2.09 \mu\text{m}$  激光的高反膜 ( $R > 99.9\%$ ) 和 785 nm 抽运光的增透膜 ( $T > 99\%$ ), 后表面镀  $2.09 \mu\text{m}$  的高反膜 ( $R = 99\%$ ) 和 785 nm 抽运光的高反膜 ( $R > 95\%$ ). 这种镀膜方

式充分利用了抽运光, 使得抽运吸收效率从抽运光单次通过时的 35% 提高到了 56%. 采用的抽运源是中心波长 785 nm 的半导体激光器 (LD), 发射截面为  $150 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ , 经过快轴压缩后最大功率 2 W, 发散角约  $8^\circ$ . 采用焦距为 32 mm 和 25 mm 的两个平凸透镜对抽运光进行聚焦, 激光晶体紧密贴在铜质热沉上, 并采用半导体制冷方式. 在铜质热沉中镶有热敏电阻, 实时监测热沉的温度. 热沉温度的控制范围为  $10\text{--}30^\circ\text{C}$ . 激光器采用红外滤光片滤除抽运光后输出, 滤光片对 1000 nm 以下全反, 对 1000 nm 以上  $T = 90\%$ . 实验中测量激光功率时采用 Coherent 公司的功率计, 其分辨率为测量档满量程 (300 mW) 的 0.1% 即 0.3 mW. 测量激光输出波长时采用 EXFO 公司的 WA 1000 波长计, 波长计选用 IR 光栅, 可测量  $1.5\text{--}4 \mu\text{m}$  波段波长, 分辨率为 1 pm.

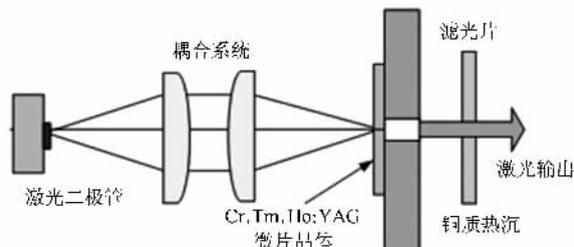


图 2 CTH:YAG 微片激光器实验装置示意图

对于平平激光腔, 抽运光的入射方向对激光输出有很大影响. 调整抽运光方向与晶体端面严格垂直后, 获得  $2 \mu\text{m}$  激光输出. 图 3 给出了热沉的温度控制在  $10^\circ\text{C}$  时, 抽运功率和激光输出功率的关系. 激光的阈值约为 1060 mW, 滤光片后获得 37 mW 的  $2 \mu\text{m}$  激光输出, 激光器斜效率为 4.6%. 在抽运功率为 1750 mW, 1560 mW 和 1280 mW 下分别改变热沉的温度, 可以看到随着温度的升高, 激光输出功率不断降低. 如图 4 所示.

对输出的  $2 \mu\text{m}$  激光采用 FP 扫描干涉仪进行单纵模性能测量. 测量时采用的是共焦扫描 FP, 自由光谱区为 2.5 GHz. 测量结果如图 5 和图 6 所示, 当激光功率小于 31 mW 时, 激光器一直为单纵模激光运转, 当激光功率大于 31 mW 时, 激光器开始出现多纵模. 这时采用波长计来测量相应功率下的激光光谱, 如图 7 和图 8 所示, 可以看到 31 mW 时激光波长为 2090.46 nm, 而当激光功率为 35 mW 时, 除了 2090 nm 附近的 2089.554 nm, 2090.713 nm 两个波长 (波长间隔 1.16 nm, 与上面计算的纵模间隔 1.2

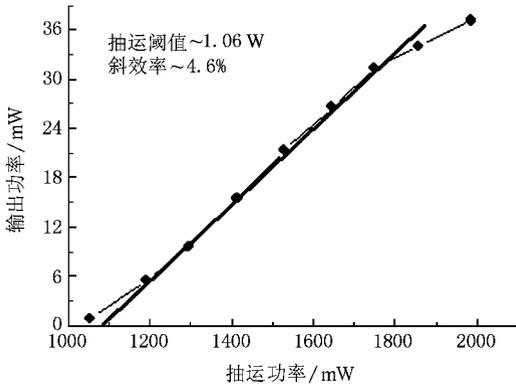


图 3 CTH:YAG 微片激光器的输出功率与抽运功率的关系

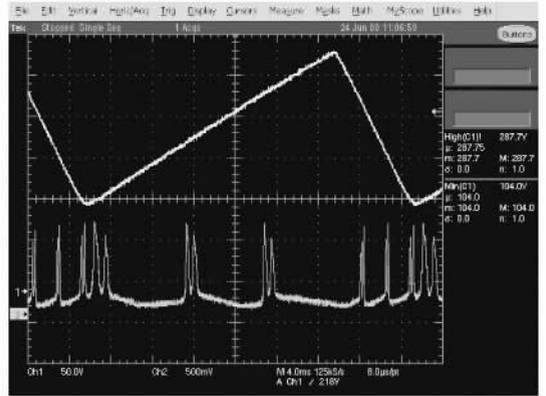


图 6 激光多纵模运转 (35 mW)

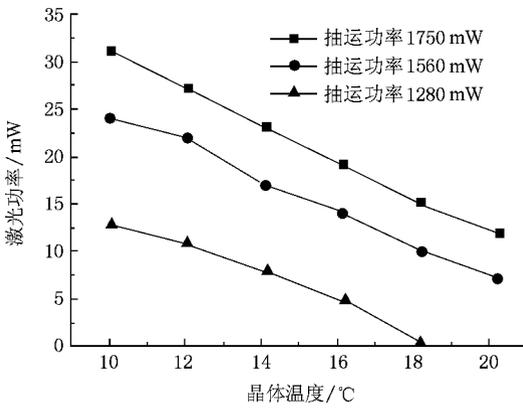


图 4 CTH:YAG 微片激光器输出功率与晶体温度的关系

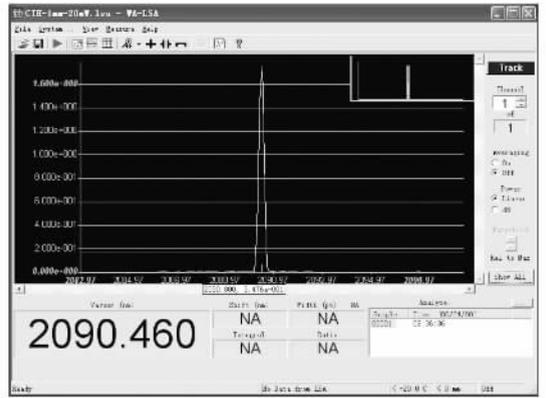


图 7 激光单纵模运转的光谱图(31 mW)

nm 符合)外,激光还出现了 2017.018 nm 波长(因与 2090 nm 波长相差太远而没有被 FP 扫描干涉仪测量出)。可以看出,这时除 Ho<sup>3+</sup> 离子产生受激辐射外, Tm<sup>3+</sup> 离子也产生了 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级到 <sup>3</sup>H<sub>6</sub> 能级的能级跃迁。

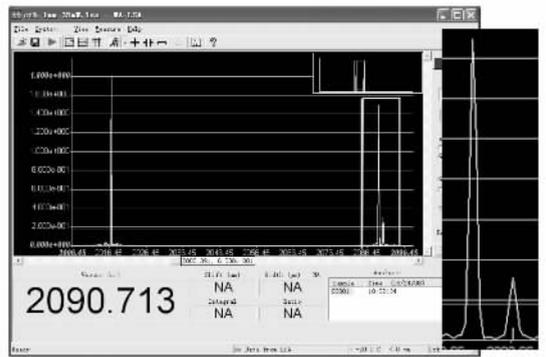


图 8 激光多纵模运转的光谱图(35 mW)

当激光器进行温度调谐,且调谐温度范围不大、没有导致跳模现象时,激光器频率漂移系数的计算公式如下<sup>[13]</sup> :

$$\frac{df}{dT} = -f \left[ \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \alpha \right], \quad (1)$$

其中  $f$  是激光频率,  $n$  为激光介质折射率,  $\frac{dn}{dT}$  是热

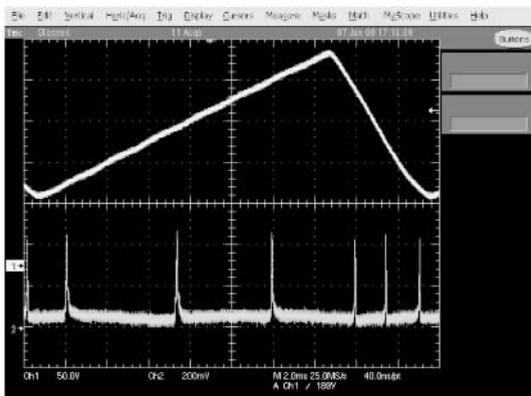


图 5 激光单纵模运转 (31 mW)

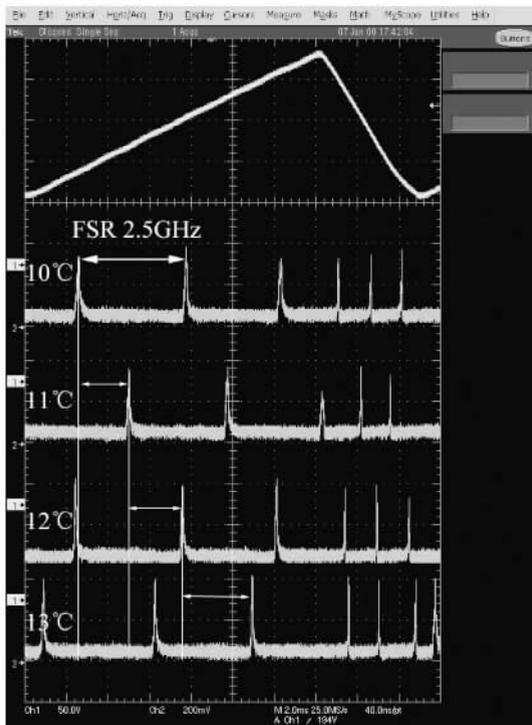


图9 频率随温度漂移示意图

致折射率变化,  $\alpha$  是热膨胀系数. 将 CTH:YAG 晶体的参数<sup>[14]</sup>代入(1)式,可以计算得到 CTH:YAG 的温度调谐系数为 1.426 GHz/°C. 在 FP 标准具测量

CTH:YAG微片激光器为单纵模激光运转时,将热沉温度从 10°C 缓慢加到 13°C,并且每隔 1°C 记录下 FP 扫描得到的信号. 在此过程中没有发现激光器有跳模现象. 将测量得到的激光频率漂移与已知的 FP 标准具自由光谱区宽度对比,即可得到 CTH:YAG 微片的频率随温度变化量,也就是 CTH:YAG 激光晶体频率的温度调谐系数. 测量结果如图 9 所示,由图中频率漂移与自由光谱区的比值可计算得出,激光频率随温度漂移约为 1.4 GHz/°C. 理论与实验数据十分符合.

## 4. 结 论

研究了 LD 抽运的 CTH:YAG 微片激光器,获得了 2  $\mu\text{m}$  波段的单纵模激光输出. 进行了激光输出功率随晶体温度变化特性的研究,发现了晶体的温度依赖性,通过降低晶体温度可获得较高功率的激光输出. 对输出激光的单纵模特性进行了测量,发现 CTH:YAG 微片激光器最大单纵模输出为 31 mW,当激光为多模运转时,不但  $\text{Ho}^{3+}$  受激辐射产生激光,而且  $\text{Tm}^{3+}$  离子也受激辐射产生激光. 进行了 CTH:YAG 激光器频率的温度调谐系数测量,测得激光器频率的漂移系数为 1.4 GHz/°C,实验结果与理论分析结果符合.

- [1] Lin Z F, Gao M W, Gao C Q 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 181 (in Chinese)[林志锋、高明伟、高春清 2007 中国激光 **34** 181]
- [2] Zhang X L, Wang Y Z, Shi H F 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 1787 (in Chinese)[张新陆、王月珠、史洪峰 2006 物理学报 **55** 1787]
- [3] Zhang X L, Wang Y Z, Li L *et al* 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 1699 (in Chinese)[张新陆、王月珠、李立等 2008 物理学报 **57** 1699]
- [4] Yu J R, Trieu B C, Modlin E A *et al* 2007 *Opt. Lett.* **31** 462
- [5] Fried N M, Noguier G, Castro-Combs A J *et al* 2007 *SPIE* **6426** 131
- [6] Hale C P, Hobbs J W, Gatt P 2003 *SPIE* **5086** 253
- [7] He C, Killinger D K 1994 *Opt. Lett.* **19** 396
- [8] Nagasawa C, Suzuki T, Nakajima H *et al* 2001 *Opt. Commun.* **200**

315

- [9] Heine F F, Huber G 1998 *Appl. Opt.* **37** 3268
- [10] Bourdet G L, Lescroart G, Muller R 1998 *Opt. Commun.* **150** 141
- [11] Yao B Q, Dong L Q, Wang Y Z *et al* 2004 *Acta. Opt. Sin.* **24** 79 (in Chinese)[姚宝权、董力强、王月珠等 2004 光学学报 **24** 79]
- [12] Yao Y C, Li Z J, Huang C Y *et al* 2007 *Acta. Photonic Sin* **36** 1351 (in Chinese)[姚育成、李正佳、黄楚云等 2007 光子学报 **36** 1351]
- [13] Kane T J, Kubo T S 1991 *Adv. Solid-State Lasers* **6** 136
- [14] Aggarwal R L, Ripin D J, Ochoa J R *et al* 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 103514



# Experimental investigation of LD-pumped Cr ,Tm ,Ho:YAG single longitudinal mode microchip laser<sup>\*</sup>

Lin Zhi-Feng Zhang Yun-Shan Gao Chun-Qing<sup>†</sup> Gao Ming-Wei

( Department of Opto-Electronics , School of Information Science and Technology , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China )

( Received 16 July 2008 ; revised manuscript received 18 August 2008 )

## Abstract

Study of LD pumped single longitudinal mode Cr ,Tm ,Ho:YAG microchip laser pumped by a 785 nm laser diode( LD ) is reported. The pump threshold power of the Cr ,Tm ,Ho:YAG microchip laser was 1060 mW and the maximum single longitudinal mode output power was 31 mW. The output power against the laser crystal temperature demonstrated the temperature sensitivity of Cr ,Tm ,Ho:YAG crystal. The frequency tuning property of the Cr ,Tm ,Ho:YAG microchip laser was also measured by changing the temperature of the crystal , and a tuning coefficient of 1.4 GHz/°C was obtained.

**Keywords** : laser technique , Cr ,Tm ,Ho:YAG microchip laser , laser diode pumping , single-longitudinal-mode-operation

**PACC** : 4255 , 4260

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60478046 ).

<sup>†</sup> E-mail : gao@bit.edu.cn