

文章编号: 0258-7025(2008)06-0815-04

激光二极管抽运的 Tm, Ho: YLF 单模激光器

吴春婷 鞠有伦 王振国 李玉峰 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了获得高效率、小型化、稳定性好的激光器, 种子激光器由激光二极管抽运 Tm, Ho: YLF 微片获得单模输出。短腔的自由光谱区比较宽, 易于选单纵模, 微片厚度 0.9 mm, 两端镀膜, 构成微型谐振腔。微片置于杜瓦瓶中, 采用液氮制冷的方式, 在低温下工作, 增加了输出激光的稳定性。利用光纤延时自拍法进行频率短期稳定度测量, 得到单模激光器短期稳定度为 2.6 kHz/ μ s, 利用示波器估测长期稳定度小于 35 MHz。获得 2.067 μ m 的单模输出, 线宽小于 40 MHz。利用刀口法测量得到光束质量为 1.082, 最大单模输出功率为 32.8 mW, 斜率效率达到 25.2%, 光-光转换效率达 23.8%, 功率输出不稳定性小于 1%。

关键词 激光器; 红外固体激光器; 激光二极管抽运; Tm, Ho: YLF 晶体; 单纵模

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser Diode-Pumped Tm, Ho: YLF Single-Frequency Laser

Wu Chunting Ju Youlun Wang Zhenguo Li Yufeng Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract To attain high efficiency, miniature and stable laser, we take Tm, Ho: YLF (Tm 6%; Ho 0.4%) microchip pumped by diode laser as the seed laser. Short resonant cavity which owns broad free spectral range is useful to select single-frequency. The microchip is 0.9 mm. Both end faces are coated. The microchip itself is the oscillate cavity. It is placed in the Dewar bottle. The bottle is filled with liquid nitrogen to keep the temperature at 77 K, which enhances the stability of output power. Self-beat of fiber delay method is used to measure the short-term frequency stability. It indicates that the short term stability is about 2.6 kHz/ μ s. And by using the oscilloscope, the long term stability is estimated at 35 MHz. Single-mode output laser with the wavelength of 2.067 μ m is obtained, and its bandwidth is less than 40 MHz. The beam quality is about 1.082 which is measured by the knife-edge method. The maximal output power is up to 32.8 mW. The slope efficiency is 25.2%, and the optical-optical efficiency is 23.8%. The instability of the output power is less than 1%.

Key words lasers; infrared solid laser; laser diode-pump; Tm, Ho: YLF crystal; single-frequency

1 引 言

2 μ m 固体激光器作为发射机的相干多普勒风速监测雷达和大气水分差分吸收雷达是激光雷达研究的重点之一^[1~4]。雷达光源通常是由一个高功率激光器将一个种子激光器输出的低功率、窄线宽、单频、稳定的激光进行放大, 从而获得高功率、窄线宽、单模运行、频率稳定的激光输出。Ho 离子 ($^5I_7 - ^5I_8$) 在 2 μ m 附近有较强的发射峰, 大气透射率高, 对人眼安全。Tm³⁺, Ho³⁺ 双掺可充分利用 Tm³⁺

粒子的光敏特性, 减少激光再吸收问题。氟化钇锂 (YLF) 晶体非常适合三价稀土离子的掺杂^[5,6], 掺有三价稀土离子的 YLF 晶体有较高的光存储容量, 具有斜率效率高、阈值低、热稳定性好的优点。以 Tm³⁺, Ho³⁺ 双掺的 YLF 晶体作工作物质的激光器已成为雷达的首选光源。

1998 年, Jirong Yu 等^[7,8] 采用 Ho: Tm: YLF 的微片作为种子源, 提供 2.052 μ m 的 10 mW 单纵模输出。2001 年, Hirotake Fukuoka 等^[9] 也进行了种

收稿日期: 2007-08-25; 收到修改稿日期: 2007-10-15

作者简介: 吴春婷(1982—), 女, 吉林人, 博士研究生, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: bigsnow1@126.com

导师简介: 鞠有伦(1967—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: juyoulun@126.com

子注入单频侧抽运 Tm, Ho:YLF 激光器的研究, 但是没有介绍种子光单模的获得方法。2007 年, 王景峰等^[10]利用激光二极管(LD)抽运的单块非平面单向行波环形腔实现 Nd:YAG 激光器的单频输出。本文利用激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 微片(Tm 原子数分数 6%, Ho 原子数分数 0.4%)获得 2.067 μm 稳定的单模输出, 单模功率达 32.8 mW。

2 理论分析

2.1 短腔法选纵模

纵模选择方法有标准具法、环形腔法、短腔法、双折射滤波片法、扭转模法和复合腔法等。双折射滤波片、标准具选模都是通过改变腔内某些波长或者模式的损耗从而达到选模效果, 损耗加大, 输出功率减小。扭转模法、环形腔法都是形成行波腔, 避免空间烧孔的形成, 从而形成单模振荡。复合腔法的损耗小, 可以得到比短腔法更高的输出功率, 但是复合腔选模能力受限于空气隙的大小和晶体与镜面表面镀膜情况, 难于精确控制。

激光工作物质在激励源的作用下, 为激光的产生提供增益, 其增益曲线如图 1 中虚线所示^[11]。谐振腔为激光的产生提供正反馈, 并具有选模作用, 实际上可以看作是由 M_1, M_2 构成的法布里-珀罗(F-P)干涉仪。激光器产生的激光振荡频率, 是一系列满足干涉条件的频率, 激光输出还必须满足一定的阈值条件, 所以激光输出的频率只有如图 1 所示的 A, B, C 等少数几个。

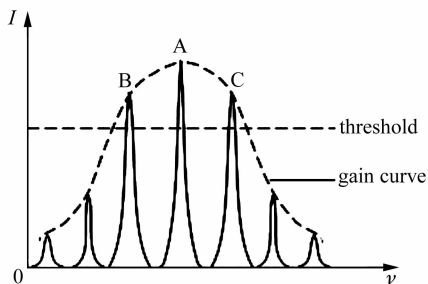


图1 激光器增益曲线及其纵模

Fig. 1 Gain curve and the longitudinal modes

短腔法选纵模的原理是尽量缩短谐振腔长度, 增大相邻纵模频率间隔, 以致在增益介质的有效增益带宽内只存在一个纵模。短腔法选纵模通常利用微片激光器实现, 相邻纵模频率间隔为

$$\Delta\nu_l = \frac{c}{2nl}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, n 为微片的折射率, l 为微片的长度。微片激光器的谐振腔是在激光晶体两个端

面直接镀膜形成的, 当晶体厚度满足短腔法选模条件时就得到单纵模微片激光器。通过外加横向应力或控制温度等方式就可以在增益带宽内进行连续的单频调谐。

2.2 输出单模线宽

激光器的每一种输出频率称为振荡频率, 每一种输出频率的频宽称为单模线宽, 相邻两个纵模间的频率间隔称为纵模间隔。若不计激光工作物质对输出频率特性的影响, 这些频率特性均可由法布里-珀罗干涉仪得出单模线宽。由多光束干涉条纹锐度分析, 干涉条纹的相位差半宽度为

$$\Delta\varphi = \frac{2(1 - \sqrt{R_1 R_2})}{\sqrt{(R_1 R_2)^{1/2}}} = 4\pi n l \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}, \quad (2)$$

因此, 以频率表示的谱线宽度为

$$\Delta\nu_l = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{c}{2\pi n l} \cdot \frac{1 - \sqrt{R_1 R_2}}{\sqrt{(R_1 R_2)^{1/2}}}. \quad (3)$$

Tm, Ho:YLF 微片激光器 $R_1 = 1, R_2 = 0.98$, $n = 1.5, l = 0.9 \text{ mm}$, 又 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 经过计算, 无源腔输出线宽为 357 MHz。

激光器工作在单轴向模时的输出线宽通常比无源或被动谐振腔产生的线宽窄若干量级^[12]。理论上激光线宽的极限值取决于自发辐射, 该自发辐射与谐振腔中已存在的波混合, 引起相位波动。这种相位波动引起有限的激光线宽 $\Delta\nu_l$, 由 Schawlow-Townes 极限给出

$$\Delta\nu_l = \frac{2\pi h\nu (\Delta\nu_c)^2}{P_{\text{out}}}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\nu_c$ 为被动谐振腔的线宽, $h\nu$ 为光子能量, P_{out} 为激光器的输出功率。

根据无源法布里-珀罗腔计算出线宽约为 357 MHz, 但考虑有源情况时, 输出激光线宽将被压缩若干数量级。通过计算, 线宽压缩极限为 13 Hz, 也就是说, 在满足一定条件的情况下, 输出线宽可以被压缩得很窄。根据后期实验, 测量得到实际的输出线宽约为 40 MHz。考虑到测量方法的问题, 实际输出激光线宽应该更窄。

3 实验装置

激光二极管纵向抽运 Tm, Ho:YLF 微片激光器的结构如图 2 所示。实验中采用 N-light 公司的激光二极管, 最大连续输出功率 2 W, 发光面的尺寸 100 μm 。在控温 25 $^\circ\text{C}$ 条件下, 测量的激光二极管发射光谱中心波长为 792.0 nm。通过控制工作温度可以对输出波长进行调谐, 波长随温度的变化率为

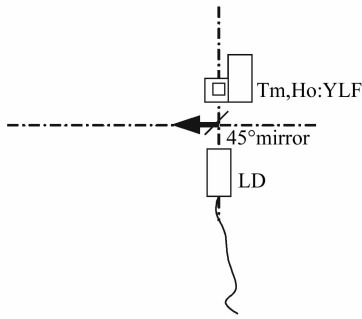


图 2 种子激光器实验装置

Fig. 2 Schematic of the experimental setup in seed laser

0.28 nm/°C。

激光二极管发出的激光经过光学耦合系统后聚焦到 Tm, Ho:YLF 微片上。光学耦合系统由一组透镜组成,固定在套筒里,免去了传统两镜分立在使用调节上带来的困难。根据所需抽运光斑大小与激光二极管提供的光斑尺寸,采用 1:1 的耦合比例,获得较好的实验结果。

实验所用的晶体为掺杂原子数分数 6% Tm³⁺, 原子数分数 0.4% Ho³⁺ 的 Tm, Ho:YLF 晶体。晶体沿 *a* 轴生长, [100] 方向切割, 外形尺寸为 3 mm × 3 mm × 0.9 mm。在晶体前端面镀 2 μm 激光的高反膜 ($R \approx 98\%$), 同时对 792 nm 激光透射率在 85% 以上; 在晶体后端面镀有 2 μm 激光的全反膜 ($R > 99.9\%$), 同时对 792 nm 全反。利用晶体固有的平行平面形成自准直的纵向抽运平平腔微片激光器, 同时实现抽运光的双程吸收。微片型激光器在晶体两端直接镀膜, 腔内元件数目降到最少, 减少了腔内损耗, 使整个装置结构紧凑、稳定性增强。尤其厚度仅为 0.9 mm, 利于单纵模的选取。晶体侧面涂有导热硅脂, 用铝箔包裹, 固定在紫铜架上, 置于杜瓦瓶中, 抽成真空, 倒入液氮制冷至 77 K, 在低温下工作。

4 实验结果及分析

4.1 输出波长的测量

Tm, Ho:YLF 输出波长的测量原理如图 3 所示。激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 微片输出激光, 经由斩波器斩波, 由单色仪输出, 利用 PbS 探测器, 配合单色仪扫描程序, 监测输出波长。经测量, Tm, Ho:YLF 微片输出波长为 2.067 μm。

4.2 输出模式的测量

利用红外相机测量 Tm, Ho:YLF 微片输出模式, 在显示器上观察, 确定输出为基横模。实验测量

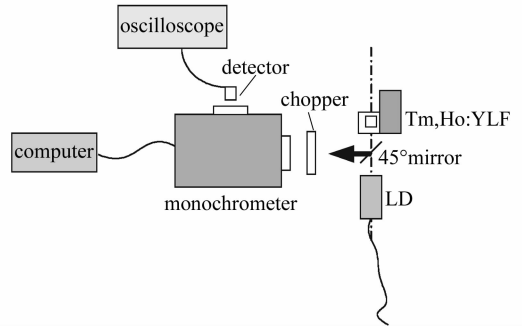


图 3 Tm, Ho:YLF 输出波长测量

Fig. 3 Measurement of the wavelength

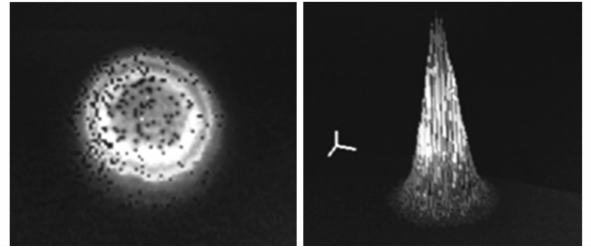


图 4 种子光输出模式测量

Fig. 4 Mode measurement of seed laser

结果如图 4 所示。

利用法布里-珀罗干涉仪和砷镓钢探测器测量 Tm, Ho:YLF 微片激光器的输出模式, 在 TDS3032B 示波器上观测输出模式。法布里-珀罗干涉仪由清华大学制作的锯齿波发生器提供扫描驱动。调节锯齿电压幅度, 使其扫描到两个自由光谱区。调节耦合系统, 找到合适的抽运点, 输出单模, 如图 5 所示。在示波器上抓图, 法布里-珀罗干涉仪为 2 cm 共焦扫描干涉仪, 自由光谱区为 3.75 GHz, 最小分辨频率差为 2 MHz, 估测输出单模的线宽为 40 MHz。考虑到线宽极限和实际的测量手段, 实际输出线宽还会更窄。同时, 利用刀口法测量并利用 OriginLab 进行曲线拟合, 得到输出激光光束质量约为 1.082。

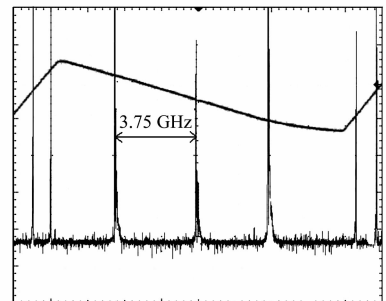


图 5 Tm, Ho:YLF 微片激光器输出模式

Fig. 5 Output mode of the Tm, Ho:YLF microchip

4.3 单模激光输出功率和效率

在模式监测条件下,利用 LPE-1A 功率计,测量单模输出功率。单模输出功率随抽运功率的变化如图 6 所示。经调节,得到最大单模输出功率为 32.8 mW,斜率效率为 25.2%,光-光转换效率达 23.8%,功率输出不稳定性小于 1%。

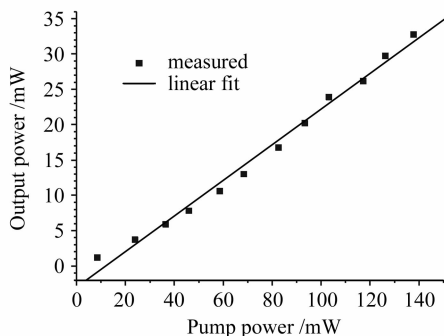


图 6 单模输出功率

Fig. 6 Output power of single-mode

与国外报道的 Tm, Ho: YLF 微片单模激光器相比,单模输出功率的斜率效率高一些,主要因为实验采用的 Tm, Ho: YLF 微片单模激光器,工作物质置于杜瓦瓶中,恒温制冷,消除了一些热效应,同时增强了输出的稳定性。利用光纤延时自拍法进行频率短期稳定度测量,得到单模激光器短期稳定度为 2.6 kHz/ μ s,利用示波器估测其长期稳定度约为 35 MHz。

5 结 论

研究了液氮制冷的激光二极管端面抽运 Tm, Ho: YLF 微片激光器,获得了 2.067 μ m 基横模、单纵模的激光输出,光束质量 M^2 因子约为 1.082。最大单模输出功率为 32.8 mW。光-光转换效率达 23.8%,斜率效率为 25.2%,功率输出不稳定性小于 1%。该单模激光器短期稳定度为 2.6 kHz/ μ s,长期稳定度约为 35 MHz。实验表明,该激光器的效率高,结构紧凑,稳定性好。

参 考 文 献

- Grady J. Koch, John P. Deyst, Mark. E. Storm. Single-frequency lasing of monolithic Ho, Tm: YLF [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18** (15):1235~1237
- Grady J. Koch, Amin N. Dharamsi, Colleen M. Fitzgerald *et al.*. Frequency stabilization of a Ho, Tm: YLF laser to absorption lines of carbon dioxide [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39** (21):3664~3669
- Grady J. Koch, Bruce W. Barnes, Mulugeta Petros *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂ [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26):5092~5099
- Grady J. Koch, Mulugeta Petros, Jirong Yu *et al.*. Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho: Tm: YLF laser [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9):1718~1721
- Yao Baoquan, Ju Youlun, He Wanjun *et al.*. Experimental analysis of spectral properties of (Tm, Ho): YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):935~938
姚宝权,鞠有伦,贺万骏等. 激光二极管抽运(Tm, Ho): YLF 激光器光谱特性实验分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):935~938
- Yao Baoquan, Wang Qi, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of (Tm, Ho): YLF microchip laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1216~1218
姚宝权,王 骐,王月珠等. (Tm, Ho): YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1216~1218
- Jirong Yu, Upendra N. Singh, Norman P. Barnes *et al.*. 125 mJ diode-pumped injection-seeded Ho: Tm: YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10):780~782
- Upendra N. Singh, Jirong Yu, Mulugeta Petros *et al.*. Injection-seeded, room-temperature, diode-pumped Ho, Tm: YLF laser with output energy of 600 mJ at 10 Hz [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **19**:194~196
- Hirotake Fukuoka, Minoru Kadoya, Kaoru Asaba *et al.*. Injection seeded Tm, Ho: YLF laser [C]. *SPIE*, 2001, **4153**: 455~462
- Wang Jingfeng, Zhang Haiyang, Zhao Changming *et al.*. Injection seeding Nd: YAG laser and its application in heterodyne detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):186~190
王景峰,张海洋,赵长明等. 种子注入固体激光相干探测实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):186~190
- Shi Shunxiang. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. 1st edition. Xian: Xidian University Press, 2000. 90~91
石顺祥. *物理光学与应用光学*[M]. 第 1 版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000. 90~91
- W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Fifth edition. Sun Wen trans.. Beijing: Science Press, 2002. 216~217
W. 克西耐尔. *固体激光工程*[M]. 第 5 版. 孙 文译. 北京: 科学出版社, 2002. 216~217