

文章编号: 0253-2239(2005)07-935-4

激光二极管抽运(Tm, Ho):YLF 激光器 光谱特性实验分析*

姚宝权 鞠有伦 贺万骏 李玉峰 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: Ho:YLF 晶体的 5I_7 和 5I_8 斯塔克能级分裂数较多,形成 2047~2070 nm 宽的增益谱带,对于可调谐 2 μm 激光及宽带激光放大器研究具有重要意义。理论上分析了(Tm, Ho):YLF 晶体的能级结构,并对晶体掺杂浓度和长度进行了优化。实验研究了激光二极管抽运微片 Tm(原子数分数 0.06), Ho(原子数分数 0.004):YLF 激光谱线可调谐特性,调谐范围 2.0656~2.0671 μm 。利用(Tm, Ho):YLF 晶体的宽增益谱特性,将其作为激光二极管抽运激光放大器,成功地将 2.048 μm (Tm, Ho):GdVO₄ 激光功率放大了 2.5 倍。实验上测量了(Tm, Ho):YLF 晶体在强抽运条件下 480~492 nm 及 530~550 nm 可见波段的上转换蓝绿光荧光谱。

关键词: 激光技术; 固体激光器; (Tm, Ho):YLF 激光器; 激光放大器; 可调谐; 上转换荧光; 激光二极管抽运
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Experimental Analysis of Spectral Properties of (Tm, Ho):YLF Laser Pumped by a Laser Diode

Yao Baoquan Ju Youlun He Wanjun Li Yufeng Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The tunability and high gain amplification of (Tm, Ho):YLF crystal with wide spectral band in the range from 2047~2070 nm are studied in theory and experiment. The crystal length and (Tm, Ho) doped concentration are optimized for room operation and high gain amplification. The microchip Tm(fraction of number of atoms 0.06), Ho(fraction of number of atoms 0.004):YLF laser is tunable from 2.0656~2.0671 μm under pumping power of 1.88 W at 792 nm. The 2.048 μm radiation from (Tm, Ho):GdVO₄ laser is amplified by cryogenic Tm(8%), Ho(1.4%):YLF amplifier dual-end pumped by two 15 W fiber-coupled laser diodes, an amplification factor of 2.5 is achieved. The blue-green upconversion fluorescence spectral from (Tm, Ho):YLF laser under strong pumping condition are measured within the radiation range of 480~492 nm and 530~550 nm.

Key words: laser technique; solid-state laser; (Tm, Ho):YLF laser; laser amplifier; tunable laser; upconversion fluorescence; laser diode pumping

1 引 言

2 μm Tm, Ho 激光由于处于人眼安全波段且具有良好的大气透过性能,因而在激光成像雷达^[1]、星载全球风多普勒激光雷达^[2]等方面有着重要应用。2 μm 掺 Tm 和掺 Ho 的激光晶体,无论以何种材料为基质,在室温下激光跃迁都呈现准三能级特

性,用闪光灯抽运存在较大的困难。而激光二极管以其高亮度及良好的单色性,纵向抽运 Tm, Ho 激光介质,很容易克服其高阈值功率,可在室温条件下实现高效率激光输出^[3]。

以 YLF 为基质的 Tm, Ho 激光介质,因为其具有 15 ms 长激光上能级寿命,适合低重复频率调 Q

* 哈尔滨工业大学校基金(HIT200214)资助课题。

作者简介: 姚宝权(1970~),男,博士,辽宁省庄河市人,主要从事固体激光器及非线性频率转换技术研究。

E-mail: bqyao@mail.hl.cn

收稿日期: 2004-06-17; 收到修改稿日期: 2004-12-1

激光的能量存储。虽然 YLF 基质脆裂应力极小,热导率及机械性能不如 YAG 基质,但其上转换系数仅为(Tm, Ho):YAG 的五分之一^[4],因而为高斜率效率提供了可能。而且其 792 nm 的抽运波长接近商品化的 800 nm 激光二极管[(Tm, Ho):YAG 抽运波长 785 nm]波长,使用寿命、成本等更接近实际应用。

为实现连续波、低阈值高效 2 μm 激光输出,设计了在晶体两端面镀高反膜的微片型(Tm, Ho):YLF 激光器,对其激光谱线、上转换荧光谱等输出特性等进行了实验研究。

2 理论分析

2.1 能级结构

(Tm, Ho):YLF 激光系统能级如图 1 所示。Tm:Ho 激光系统中, Tm³⁺ 为敏化离子,吸收抽运激光, Ho³⁺ 因为有大受激发射截面[(14~20) × 10⁻²⁰ cm²]而作为激活离子。Tm³⁺ 的掺杂原子数分数和为 3%~12% 时,相邻 Tm³⁺ 离子之间会发生交叉弛豫,被激发到³H₄ 高能态的粒子向下跃迁以及低能态³H₆ 的粒子向上被激发,在 Tm³⁺ 的³F₄ 能级上留下两个稳定粒子,因而抽运效率为 2,即

$$\{^3H_6, ^3H_4\} \Rightarrow \{^3F_4, ^3F_4\}. \quad (1)$$

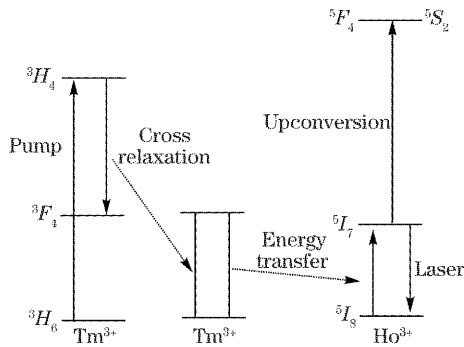


图 1 (Tm, Ho):YLF 激光系统的能级跃迁图

Fig. 1 Diagram of transition levels of (Tm, Ho):YLF laser system

Tm³⁺ 的³F₄ 能级与 Ho³⁺ 的⁵I₇ 能级相邻很近,因而将能量传递给 Ho³⁺ 的⁵I₇,如(2)式。2 μm 辐射是由⁵I₇ 向⁵I₈ 跃迁产生。

$$\{^3F_4, ^5I_8\} \Rightarrow \{^3H_6, ^5I_7\}, \quad (2)$$

Tm³⁺、Ho³⁺ 的光跃越发生在 4f^N 电子组态之间。对于掺杂在晶体中的离子,其能级在晶体场的作用下,分裂为斯塔克能级。斯塔克效应导致抽运和辐射跃迁能级分裂成多重态,不同的基质材料分裂方式不同,表 1 列出 Ho:YLF 位于⁵I₇ 和⁵I₈ 的斯

塔克能级,表 1 中“*”表示简并能级。YLF 基质中, Ho³⁺ 激光的下能级位于 217~315 cm⁻¹ 之间的某一个斯塔克能级上,接近基态,而上能级位于 5153~5293 cm⁻¹ 之间的某一个斯塔克能级上。Ho:YLF 提供的增益范围在 2047~2070 nm。

表 1 Ho:YLF 中的斯塔克能级
Table 1 The Stark levels of Ho:YLF

Manifold	Levels	Energy /cm ⁻¹
⁵ I ₈	13	0*, 7, 23, 48, 56, 72*, 217, 270*, 276, 283, 290, 303*, 315
		5153, 5157*, 5164, 5170, 5185*, 5207, 5229*, 5233, 5291, 5293*, 5293

从表 1 中可看出,由于 Ho:YLF 的⁵I₇ 的斯塔克能级分裂数多,而且有四个简并能级,虽然导致室温下光学透明粒子数反转比高(约 24%, Tm:YAG 仅 4%),但激光上能级粒子占整个 Tm³⁺ F₄, Ho³⁺ I₇ 耦合激发态粒子总数的比例为 71%[(Tm, Ho):YAG 为 53%],与之相联系的是减小了上转换损耗^[5]。

2.2 晶体参量优化

(Tm, Ho):YLF 在室温条件下运行为准三能级系统,重吸收损耗导致高阈值和低斜率效率。根据重吸收系数 α₁ (单位为 cm⁻¹) 的表达式为

$$\alpha_1 = \sigma_1 \cdot f_1 \cdot N_{Ho}, \quad (3)$$

式中 σ₁ 为受激发射截面(单位为 cm²), f₁ 为激光下能级粒子数与整个⁵I₈ 多重态总粒子数的比值, N_{Ho} 为 Ho³⁺ 离子的密度(单位为 cm⁻³)。要降低重吸收损耗对激光性能的影响,可通过制冷晶体减小 f₁ 以及减小激光介质中 Ho³⁺ 离子的掺杂原子数分数两种方式。室温条件下, (Tm, Ho):YLF 中 Ho³⁺ 离子的掺杂原子数分数通常选取 0.3%~0.4%, 本实验选用的是 0.4%。为增加对抽运光的吸收, Tm³⁺ 离子的掺杂原子数分数选择为 6%, 二者的原子数比例为 15:1。

(Tm, Ho):YLF 对 π 偏振 792 nm 抽运光吸收截面为 σ_p = 0.65 × 10⁻²⁰ cm², Tm³⁺ 离子的密度为 8.3 × 10²⁰ cm⁻³, 计算吸收系数 α_p = 5.4 cm⁻¹。晶体长度的选择,既要保证抽运光的有效吸收,又要考虑到重吸收损耗的影响。过长的晶体,未被有效抽运的部分,不但不能提供激光增益,反而增加重吸收损耗。本实验选择的晶体长度为 2.5 mm, 单程吸收 74%。为增加有效吸收,在晶体的后端面镀 792 nm 的全反膜,双程吸收达 93%。在室温条件下, 0.4% 的 Ho³⁺ 引起的往返重吸收损耗为 9.4%。采用 10 mm 长的 Tm(5%)、Ho(0.5%):YLF 晶体

实验表明,即使晶体制冷到 0 °C 以下,由于长晶体重吸收损耗严重,而且导致热负载严重,晶体表面容易脆裂,抽运功率 5 W 条件下 2 μm 激光功率输出最高仅 200 mW。理论分析及实验探索结果表明,2.5 mm 长、6% Tm 和 0.4% Ho 双掺 YLF 是实现室温条件下 2 μm 激光输出的最优化选择。

3 实验结果及讨论

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示,在实验中采用激光二极管最大连续输出功率 2.7 W,在 25 °C 条件下,激光二极管激光谱中心波长为 792.8 nm。激光二极管纵向抽运的 Tm, Ho: YLF 激光器的结构在文献 [6,7] 已有详细描述。792 nm 激光二极管激光经光学整形聚焦到 Tm(6%),Ho(0.4%):YLF 晶体中。晶体外形尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 2.5 mm, 透光轴为 a 轴。晶体前端面镀有 2 μm 激光的高反膜 ($R \approx 98\%$), 后端面镀有对 2 μm 激光全反且对 792 nm 高反的薄膜。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。激光二极管抽运功率 1.88 W, 2.06 μm 连续输出功率为 328 mW, 斜率效率是 22.5%, 光-光转换效率达 17.4%。

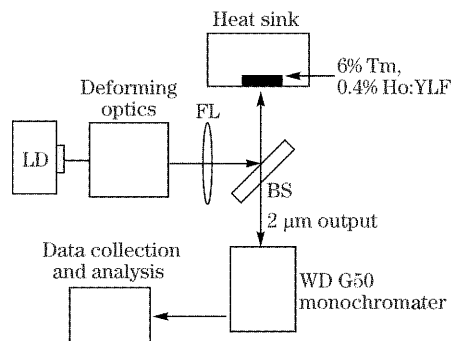


图 2 激光二极管抽运微片(Tm, Ho):YLF 装置图

Fig. 2 Experimental configuration of laser diode pumped microchip (Tm, Ho):YLF laser

3.2 (Tm, Ho):YLF 激光光谱

激光波长的测量采用 WDG50-1A 型光栅单色仪,光栅刻痕为 300 lp/mm, 闪耀波长 1.8 μm 。斩波器将连续光变成周期性方波信号,单色仪的出射狭缝处的脉冲光信号由光导型 PbS 探测,输出信号经 Model-115 前置放大器放大。放大后的信号,一路输入到示波器监测,另一路输入到 HY-1232 模-数转换卡,将模拟信号转换成数字信号,存储到计算机中。通过高压 Hg 灯谱线和 He-Ne 激光谱线对单色仪定标。测量 (Tm, Ho):YLF 激光波长为

2.0661 μm , 线宽约 2~3 nm, 如图 3 所示。

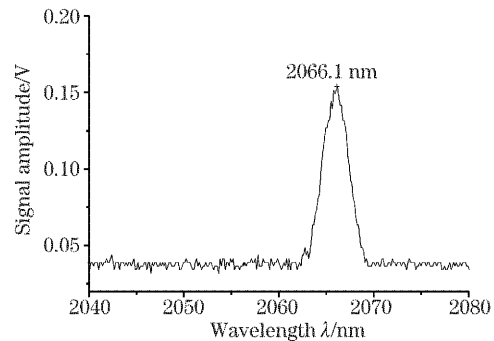


图 3 2 μm (Tm, Ho):YLF 激光谱线

Fig. 3 Spectral line of (Tm, Ho):YLF laser at 2 μm

由于 Ho:YLF 的 5I_7 及 5I_8 多重态存在多个斯塔克能级分裂,因而能提供 2.047~2.070 μm 宽增益谱范围。另外,微片激光器本身的法布里-珀罗标准具具有波长选择效应和受晶体温度变化影响,测量 (Tm, Ho):YLF 激光的输出波长的范围为 2.0656~2.0671 μm , 调谐间隔 0.5 nm。

如果将微片结构改成腔内插入法布里-珀罗标准具腔型结构,通过改变法布里-珀罗标准具的角度,可以实现 2.051~2.067 μm 可控、不连续波长调谐。采用薄厚双标准具结构,波长调谐更接近连续,对利用 (Tm, Ho):YLF 激光差分吸收雷达测量大气中 CO_2 (位于 $2\nu_1 + \nu_3$ 带) 和水蒸气浓度具有重要意义。

因为晶体本身对振荡光的自吸收损耗的影响,在室温下运行时,振荡激光波长远离发射荧光谱峰,即出现“红移”现象。随着晶体温度的降低,自吸收减小,振荡激光波长会出现“蓝移”现象,测量的 77 K 下 (Tm, Ho):YLF 晶体发射的激光波长为 2.051 μm 。

利用 (Tm, Ho):YLF 介质的宽增益谱特性,可以将其作为激光放大器。在我们的一个实验中,利用两个功率 15 W、波长 792 nm 的激光二极管双端面抽运 Tm(8%),Ho(1.4%):YLF,晶体采用液氮冷却,如图 4 所示。光纤耦合激光二极管数值孔径 0.3, 芯径 400 μm 。(Tm, Ho):YLF 晶体尺寸 5 mm \times 5 mm \times 10 mm, 透光轴 a 轴,晶体用铝箔包裹,放置在与液氮相连的铜块中。入射的 2.048 μm (Tm, Ho):GdVO₄ 激光被 M_2 反射并与原光束偏离 0.5°,二次通过 (Tm, Ho):YLF 放大器^[8]。激光输出功率用 Newport 2835C 功率计监测,探头为 818T-30。在低温条件下,成功地将 2.048 μm (Tm, Ho):GdVO₄ 激光进行了有效放大,振荡级 4 W 的输出功率被放大到 10 W,放大倍数为 2.5 倍。

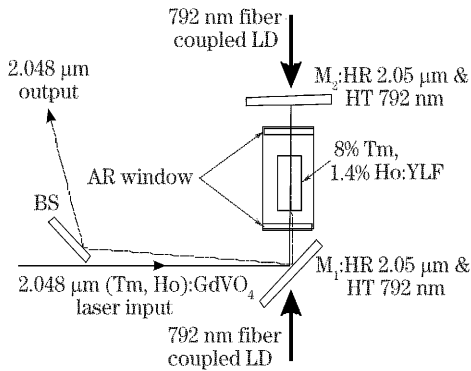


图4 2.048 μm 双端面抽运双程放大
(Tm, Ho):YLF 放大器

Fig. 4 Double-pass (Tm, Ho):YLF amplifier with
dual-end pumping configuration at 2.048 μm

3.3 上转换荧光

当抽运光聚焦到晶体内部时,产生肉眼可识的绿

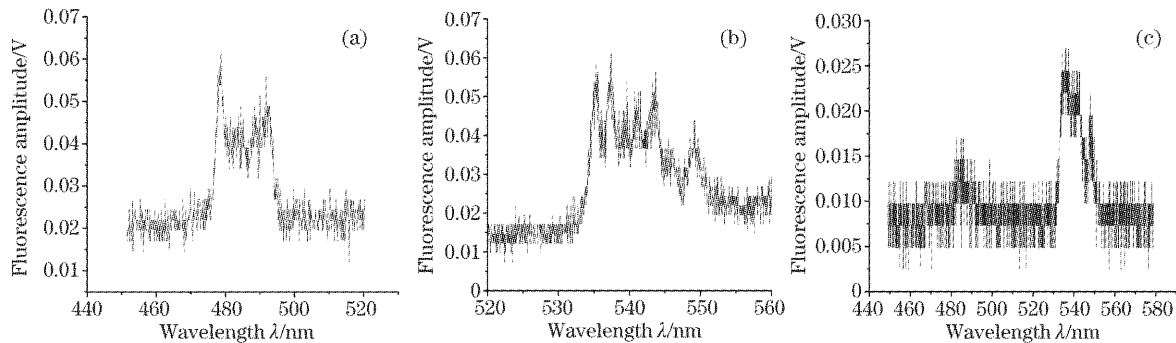


图5 (Tm, Ho):YLF 位于可见光谱区域的上转换荧光光谱

Fig. 4 Upconversion green fluorescence spectra of (Tm, Ho):YFL in visible region

上转换荧光也是判断激光运行性能的一个依据,当抽运光模式与振荡激光模式不匹配,激光输出功率低,晶体发出很强的荧光;当激光器完全准直,绿色荧光中心出现一个日全食一样的黑斑,荧光强度变暗,表明布居在 $\text{Ho } ^5I_7$ 的粒子大部分跃迁到 5I_8 多重态产生高效激光输出。

4 结 论

(Tm, Ho):YLF 的斯塔克能级分裂数多达24个,形成的宽增益谱带特性对需要可调谐激光的差分吸收雷达具有重要意义。直接在晶体两端镀 $2 \mu\text{m}$ 反射膜的微片激光器调谐范围窄,进一步的工作将采用薄片晶体加腔内法布里-珀罗珀标准具方案,进而实现 $2 \mu\text{m}$ 附近宽带调谐输出。进一步优化 (Tm, Ho):YLF 放大器设计,提高抽取效率。

参 考 文 献

1 Kei Ota, Yasuharu Mine, Minoru Doshida *et al.*. A novel multi-function 2-micron imaging laser radar system[C]. *Proc. SPIE*,

色荧光。测量的荧光光谱如图5所示。在实验中选用 1200 lp/mm 光栅,利用光电倍增管探测可见波段荧光信号。根据 Tm, Ho 系统的能级跃迁表,可知对于 Ho^{3+} , 存在 $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$: 539~550 nm, $^5F_4 \rightarrow ^5I_8$: 534~546 nm 的跃迁辐射,如图5(b);以及 475~495 nm 的蓝绿荧光光谱,对应是 $^5F_3 \rightarrow ^5I_8$: 481~492 nm, $^5F_2 \rightarrow ^5I_8$: 471~480 nm 的跃迁辐射,如图5(a)所示。480 nm 蓝绿荧光光谱强度约为 540 nm 荧光强度的三分之一,如图5(c)所示。

对于室温条件下运行的准三能级激光系统,在横向弛豫过程中,会发生上变频效应,即粒子跃迁到激光上能级 5I_7 以上的其它能级。特别是可能与 Tm^{3+} 离子的其它能级发生谐振的过程时,上转换速率会更大。上转换会消耗上能级粒子数,进而降低激光增益和转换效率。

1999, **3865**: 128~133
2 Jirong Yu, Upendra N. Singh, Norman P. Barnes. An all solid-state 2- μm laser system for space coherent wind lidar[C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**: 27~33
3 B. T. McGuchkin, R. T. Menzies. Efficient CW diode-pumped Tm, Ho:YLF laser with tunability Near 2.067 μm [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4): 1025~1028
4 Didier Bruneau, Stephane Delmonte, Jacques Pelon. Modeling of Tm, Ho:YAG and Tm, Ho:YLF 2- μm lasers and calculation of extractable energies[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(36): 8404~8419
5 B. T. McGuchkin, R. T. Menzies, H. Hemmati. Efficient energy extraction from a diode-pumped Q-switched Tm, Ho:YLiF₄ laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(23): 2926~2928
6 Yao Baoquan, Dong Liqiang, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of microchip Tm, Ho:YLF laser pumped by laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 79~83 (in Chinese)
姚宝权,董力强,王月珠等. 激光二极管抽运的 Tm, Ho:YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 79~83
7 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 (in Chinese)
姚宝权,王 骐,王月珠等. (Tm, Ho):YLF 微片激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1216~1218
8 Baoquan Yao, Xingbao Zhang, Yuezhu Wang *et al.*. LD pumped 2- μm CW laser from Tm, Ho:GdVO₄[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 595~596