

激光二极管端面抽运 $Tm, Ho : YLF$ 激光器双稳特性研究*

张新陆¹⁾ 王月珠²⁾ 李 立¹⁾ 鞠有伦²⁾

1) 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨工业大学光电技术研究所可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2007 年 5 月 13 日收到 2007 年 6 月 20 日收到修改稿)

报道了波长为 792 nm 激光二极管端面抽运 $Tm, Ho : YLF$ 连续激光器的双稳输出特性. 激光晶体温度为 283 K 时, 双稳区的宽度为 100 mW, 跃变点输出功率的跃变量为 15 mW. 实验上还研究了晶体温度对 2 μm 激光双稳特性的影响, 当晶体温度从 283 K 升高到 298 K 时, 双稳区的宽度由 100 mW 减小到 60 mW, 跃变点输出功率的跃变量由 15 mW 下降到 6 mW. 通过分析可知, $Tm, Ho : YLF$ 连续激光器的双稳输出是由能量传递上转换、激发态吸收以及激光下能级对 2 μm 输出激光再吸收共同作用的结果.

关键词: 端面抽运, $Tm, Ho : YLF$ 晶体, 连续输出, 光学双稳

PACC: 4255B, 4260, 4265P

1. 引 言

输出波长为 2 μm 的固体激光器具有人眼安全特性以及大气穿透性好等优点, 因此在激光测距机、相干多普勒雷达、差分吸收雷达以及医疗等领域得到了广泛地应用^[1-4]. 而 $Tm, Ho : YLF$ 激光晶体由于其优良的物理特性以及线偏振输出等特点, 更成为 2 μm 固体激光器的优选晶体. 许多课题组对 $Tm, Ho : YLF$ 固体激光器的输出特性进行了广泛研究^[5-10], 但是还未见有关 $Tm, Ho : YLF$ 固体激光器双稳输出的报道.

自从 1979 年 Ruschin 观察到 CO_2 激光器的双稳输出以来^[11], 激光光学双稳由于其光学逻辑器件、光开关、光通信和光学存储等领域的潜在应用而成为了一个重要的研究领域. 目前已经观察到了几种类型激光器的双稳输出, 例如 1.3 μm InAs 量子点激光器的双稳输出^[12], 掺 Er^{3+} 光纤激光器的双稳输出^[13-16], 掺 Yb^{3+} 光纤激光器的双稳输出^[17], 两段式半导体激光器的双稳输出^[18]. 在以往人们对激光双稳态的研究工作中, 普遍采用饱和吸收机理和色散机理.

本文对激光二极管端面抽运 2 μm $Tm, Ho : YLF$ 激光器的光学双稳特性进行了详尽地研究. 当晶体

的温度为 283 K 时, 输出激光的双稳区为 100 mW, 跃变点输出功率的跃变量为 15 mW. 通过改变激光晶体的温度, 我们实验上观察了温度对激光输出双稳特性的影响. 通过分析我们发现 $Tm, Ho : YLF$ 激光器 2 μm 输出激光的光学双稳是由能量传递上转换、激发态对抽运光的吸收以及 Tm, Ho 准三能级系统的下能级对 2 μm 激光的再吸收共同作用的结果.

2. 粒子跃迁过程

图 1 给出了 $Tm, Ho : YLF$ 激光晶体中 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的粒子跃迁及能量传递的过程. 波长为 792 nm 的抽运光被 3H_6 Tm^{3+} 吸收跃迁到 3H_4 能级. 一个 3H_4 Tm^{3+} 通过与其周围的 Tm^{3+} 横向弛豫产生了两个 3F_4 Tm^{3+} , 这个过程大约有 75% 的能量效率, 而另 25% 的能量被转化为晶体热能; 同时伴随着 3F_4 Tm^{3+} 向 5I_7 Ho^{3+} 的一系列能量传递过程. 当 5I_7 Ho^{3+} 数量增加到一定值时又将发生 5I_7 Ho^{3+} 向更高能级的能量传递上转换过程 ($^3F_4 + ^5I_7 \rightarrow ^3H_6 + ^5I_5$), 发生上转换的粒子其中一部分将经过无辐射弛豫及能量传递而返回原来的能级, 但总体上转换过程限制了 5I_7 Ho^{3+} 的增加. 同时, 伴有 5I_7 Ho^{3+} 对 792 nm 抽运光的吸收,

* 高等学校博士学科点专项基金(批准号 20070217014)资助的课题.

这个激发态吸收过程($^5I_7 \rightarrow ^5S_2 + ^5F_4$)同样限制了 $^5I_7\text{Ho}^{3+}$ 的增加.随着此跃迁过程发生了 $^5F_4, ^5S_2 \rightarrow ^2I_8$ 的跃迁过程,产生波长为 540 nm 绿色荧光辐射. $^3F_4\text{Tm}^{3+}$ 向 $^5I_7\text{Ho}^{3+}$ 有效的能量转移使 Ho^{3+} 在 5I_7 能级有显著的集居,最终导致 5I_7 向 5I_8 跃迁产生了 $2\ \mu\text{m}$ 的激光.由于 Tm, Ho:YLF 激光器的准三能级特性,激光的下能级在近室温有粒子数集居,因此出现了激光下能级粒子对 $2\ \mu\text{m}$ 激光的再吸收现象.

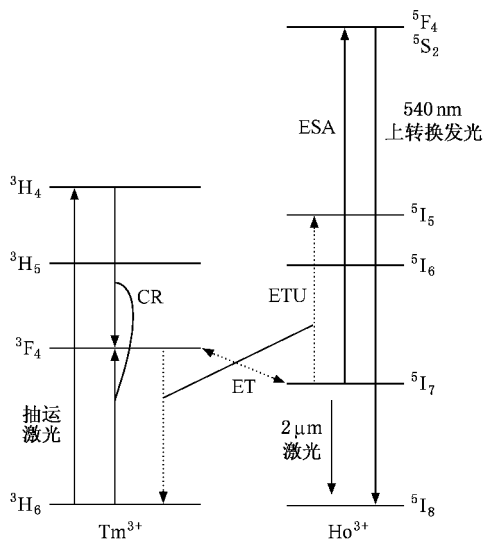


图1 Tm, Ho:YLF 激光晶体能级结构及粒子跃迁示意图(图中,CR为横向弛豫过程;ET为能量传递过程;ETU为能量传递上转换过程;ESA为激发态吸收过程)

3. 实验装置

实验装置如图2所示,谐振腔采用平凹直腔结构,腔长为45 mm,输出耦合镜的曲率半径为51.88 mm,透过率为2%.抽运源是美国相干公司提供的输出功率为3 W的S-79-3000C-200-H/L型InGaAsP激光二极管,利用温控系统将激光二极管的发射波长调到 Tm, Ho:YLF 晶体的最强吸收峰792 nm处,从而最大限度地利用抽运光.抽运光首先经焦距为8 mm的球面透镜进行准直,然后用焦距为100 mm的柱透镜对发散角大的方向压缩光束的发散角,再用焦距为65 mm的消色差透镜将抽运光束聚焦于激光晶体内,抽运光束腰半径 $\omega_{p0} \approx 100\ \mu\text{m}$.由于抽运光束传输系统的各光学元件表面都镀有792 nm增透膜,使得光学系统总的传输效率可达91%以上.实验所用的激光晶体为6%(摩尔比) Tm ,0.4%(摩尔比) Ho:YLF 晶体,晶体外形尺寸为 $5\ \text{mm} \times 5$

$\text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$.采用吸收系数大的 π 方向即激光二极管输出光的偏振方向与晶体 c 轴平行.晶体的前后表面都经过抛光处理,在晶体前表面镀有 $2\ \mu\text{m}$ 激光的高反膜,反射率大于99.9%,同时对792 nm抽运光增透,透射率在85%以上;在晶体的后表面镀有 $2\ \mu\text{m}$ 激光的增透膜.将晶体嵌入到热电制冷的铜质热沉中,以有效地控制激光晶体的温度,其控温精度可达 $\pm 0.01\ \text{K}$.

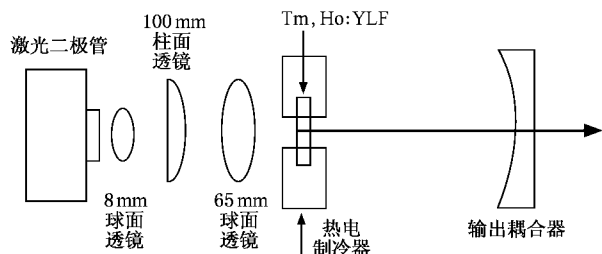


图2 连续 Tm, Ho:YLF 激光器实验装置示意图

4. 实验结果与分析

在实验过程中保持 Tm, Ho:YLF 激光晶体的温度为283 K时,我们测量了输出功率随抽运功率的变化关系,如图3所示.由图3可见,当抽运功率开始增加时 $2\ \mu\text{m}$ 激光没有振荡,直到抽运功率达到200 mW这一跃变点, $2\ \mu\text{m}$ 激光输出功率从0直接跃变到15 mW,我们称此跃变点为上阈值抽运功率点,写为 $P_{\text{up, th}}$.当抽运功率超过这一跃变点, $2\ \mu\text{m}$ 激光的输出功率随抽运功率近乎线性增加.当抽运功率达到最大值后,再减小抽运功率的数值,当降到略低于上阈值抽运功率点 $P_{\text{up, th}}$ 时, $2\ \mu\text{m}$ 激光仍有一定的输出功率,进一步减小抽运功率直到抽运功率降到100 mW时, $2\ \mu\text{m}$ 激光才停止振荡即输出功率降到零,我们称此时的抽运功率阈值为下阈值抽运功率点,写为 $P_{\text{down, th}}$.因此,输出功率随抽运功率的变化关系形成了一个磁滞环.抽运功率在 $P_{\text{down, th}} < P_{\text{in}} < P_{\text{up, th}}$ 这个范围, Tm, Ho:YLF 激光器的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出是双稳的,在此抽运功率范围内,对于某一给定的抽运功率,其输出功率的数值取决于抽运功率达到此功率点的方式(例如抽运功率从 $P_{\text{down, th}}$ 增加到此功率点,则无 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出;若抽运功率从大于 $P_{\text{up, th}}$ 的某一点降到此功率点,则有 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出).根据图1的粒子跃迁过程,我们对 Tm, Ho:YLF 激光器的激光双稳输出做如下分析,当抽运功率低于

$P_{up,th}$ 且无激光输出时,随着抽运功率的增加,激光器的上能级粒子数密度增大,而能量传递上转换速率与激光上能级粒子数密度成平方关系,激发态吸收速率正比于上能级粒子数密度与抽运光功率的乘积,因此能量传递上转换和激发态吸收在非出光的状态下随抽运功率的增加而变得越发严重,造成 $Ho^{3+} 5I_7$ 激光上能级粒子数减少越发明显.特别是能量传递上转换效应,在无激光输出的状态,不但严重地减少了激光上能级的粒子数,而且对激光晶体产生了明显的热效应,从而导致激光晶体内部的温度升高.由于 $Tm, Ho: YLF$ 激光晶体的准三能级特性,其激光下能级粒子随晶体温度的增加而增加,从而

造成激光下能级粒子对 $2 \mu m$ 激光再吸收的增加,因此必然进一步造成激光阈值的增加.相反,在有激光发射的状态下减小抽运功率, $2 \mu m$ 激光的受激发射过程压制了能量传递上转换过程和激发态对 $792 nm$ 抽运光的吸收过程,削弱了上述两个过程对上能级粒子数的减小.在实验过程中,我们发现一旦有 $2 \mu m$ 激光输出,由于激发态吸收造成的绿色上转换荧光马上由强变弱.相对于非出光状态,在相同抽运条件下,热转换系数变小,晶体内部的温度升高必然随之减小,从而激光下能级的粒子数较非出光的状态小,激光下能级的粒子对 $2 \mu m$ 激光的再吸收因此而减少,使得阈值抽运功率减小.

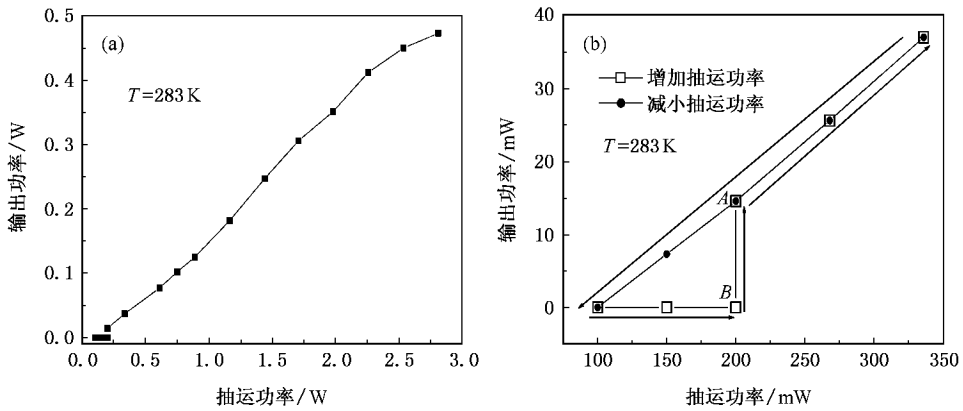


图3 输出功率随抽运功率的变化关系,在近阈值处显示出明显的双稳输出

为了分析激光晶体的温度对 $Tm, Ho: YLF$ 激光器双稳特性的影响,我们得到了激光晶体的温度分别为 $283 K, 288 K, 293 K$ 和 $298 K$ 四个温度时 $Tm, Ho: YLF$ 激光器的输出功率随抽运功率的变化关系,如图4所示.由图4可见,当激光晶体的温度由 $283 K$ 增加到 $298 K$ 时,下阈值抽运功率 $P_{down,th}$ 从 $100 mW$ 增加到 $140 mW$,而激光上阈值抽运功率 $P_{up,th}$ 几乎没有变化,因此双稳区由 $100 mW$ 减小到 $60 mW$,输出功率的跃变量由 $15 mW$ 减小到 $8 mW$,这恰恰是由于 $Tm, Ho: YLF$ 激光晶体的准三能级特性造成的.随着激光晶体温度的升高,激光器下能级有更多的粒子集居,增加了基态粒子对 $2 \mu m$ 激光的再吸收,并且随着激光晶体温度的升高, Tm^{3+} 向 Ho^{3+} 的净能量转移效率降低,因此激光晶体温度的升高导致了下阈值抽运功率的增加和跃变点处跃变输出功率的减小.

我们对输出光束远场光斑的空间强度分布进行了测量,在距离晶体输入端 $52 cm$ 处,使用一个直径约为 $0.2 mm$ 的针孔沿光斑的水平方向和垂直方向

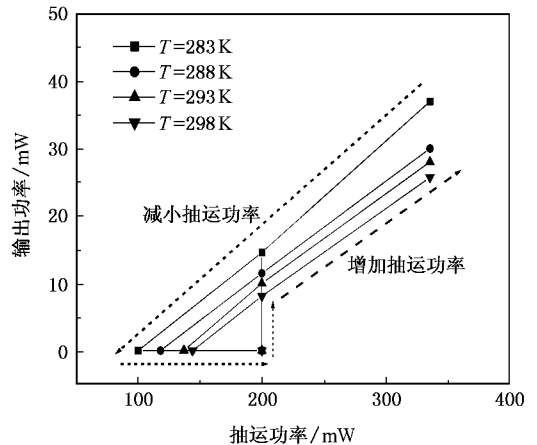


图4 不同温度下输出功率随抽运功率的变化关系

扫描,用功率计记录各点透过的功率值,测得了光斑空间光强分布,结果如图5所示.图5中的实线代表标准的高斯分布,由所测数据对高斯函数进行拟合所得.由图5可以看出输出光斑强度非常接近高斯分布,证明了激光器工作于 TEM_{00} 模.

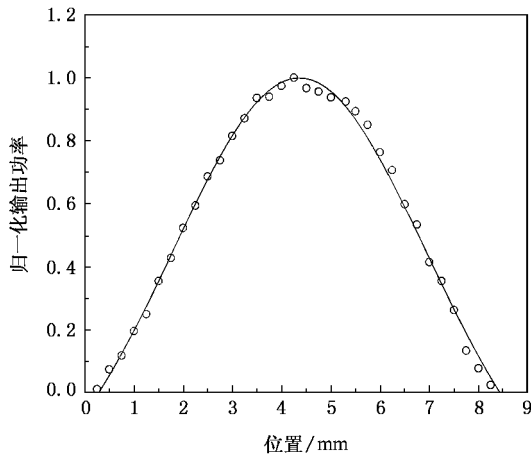


图5 抽运功率为 2.5 W 时远场光斑的强度分布

5. 结 论

报道了激光二极管端面抽运 $2\ \mu\text{mTm}$, Ho:YLF 连续激光器的双稳输出特性. 该激光器采用了简单的平凹腔结构, 激光晶体的温度为 283 K 时, 输出激光的双稳区为 100 mW. 输出功率在跃变点的跃变量为 15 mW. 实验分析了晶体温度对输出激光的双稳特性的影响, 发现随着晶体温度的升高, 双稳区减小, 并且开关点输出功率的跃变量也随之减小. 通过对粒子跃迁和能量传递过程的详细分析发现, Tm , Ho:YLF 激光器的双稳输出是能量传递上转换、激发态吸收以及基态再吸收共同作用的结果.

- [1] Yu J, Singh U N, Barnes N P, Petros M 1998 *Opt. Lett.* **23** 780
- [2] Koch G J, Petros M, Yu J, Singh U N 2002 *App. Opt.* **41** 1718
- [3] Galzerano G, Sani E, Toncelli A, Della V G, Taccheo S, Tonelli M, Laporta P 2004 *Opt. Lett.* **29** 715
- [4] Yu J, Trieu B C, Modin E A, Singh U P, Kavaya M J, Chen S, Bai Y, Petzar P J, Petros M 2006 *Opt. Lett.* **31** 462
- [5] Bourdet G L, Lescroart G 1999 *Appl. Opt.* **38** 3275
- [6] Meguckin B T, Menzies R T 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 1025
- [7] Sudesh V, Asai K 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1829
- [8] Zhang X, Ju Y, Wang Y 2005 *Opt. Express* **13** 4056
- [9] Zhang X L, Wang Y Z, Ju Y L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 117 (in Chinese) [张新陆、王月珠、鞠有伦 2005 物理学报 **54** 117]
- [10] 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]
- [11] Ruschin S, Bauer S H 1979 *Chem. Phys. Lett.* **66** 100
- [12] Huang X, Stintz A, Li H, Rice A, Liu G T, Lester L F, Chen J, Malloy K J 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 414
- [13] Oh J M, Lee D 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 374
- [14] Mao Q H, Lit J W Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1335
- [15] Mao Q H, Lit J W Y 2002 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **14** 1252
- [16] Mao Q H, Feng S J, Jiang J, Zhu Z J, Zhu W Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 297 (in Chinese) [毛庆和、冯素娟、蒋建、朱宗玖、朱文清 2007 物理学报 **56** 297]
- [17] Li J L, Musha M, Shirakawa A, Ueda K I, Zhong L X 2006 *Electron. Lett.* **42** 8
- [18] Dziura T G 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 651

Optical bistability performance of laser-diode end-pumped Tm, Ho : YLF laser^{*}

Zhang Xin-Lu^{1)†} Wang Yue-Zhu²⁾ Li Li¹⁾ Ju You-Lun²⁾

¹⁾ College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

²⁾ State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 13 May 2007 ; revised manuscript received 20 June 2007)

Abstract

The bistable output of a 792 nm laser-diode end pumped continuous wave Tm, Ho : YLF laser is reported for the first time. When the temperature of the Tm, Ho : YLF crystal is 283 K, the width of bistable section is 100 mW, and the jump power at the turning point is 15 mW. The influence of crystal temperature on the bistable performance of 2 μ m laser is studied in the experiment. The width of bistable section was reduced from 100 mW to 60 mW and the jump power at the turning point reduced from 15mW to 6 mW respectively, when the temperature of laser crystal is increased from 283 K to 298 K. The bistable output in the continuous wave Tm, Ho : YLF laser comes from the co-effect of the energy transfer upconversion, excited state absorption and lower level reabsorption of 2 μ m laser light.

Keywords : end-pumped, Tm, Ho : YLF crystal, continuous wave output, optical bistability

PACC : 4255B, 4260, 4265P

^{*} Project supported by the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No.20070217014).

[†] E-mail : zhangxinlu1@sohu.com