

# 不同掺杂浓度和输出透射率对 Tm:YAP 激光器性能的影响

李红姝 赵明 许文海

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要** 实验研究了离子掺杂浓度以及输出镜透射率对 Tm:YAP 激光器输出性能的影响。晶体沿  $c$  轴切割, 尺寸为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , 在输出镜透射率为 5% 的条件下研究了掺杂离子数分数分别为 3%、4% 和 5% 三种情况的激光性能。结果表明, 掺杂离子数分数为 4% 的 Tm:YAP 晶体输出性能最好, 当抽运功率为 24.8 W 时, 连续输出功率最大为 7.5 W, 斜率效率为 48.8%。使用掺杂离子数分数为 4% 的 Tm:YAP, 研究了 2%、5% 和 10% 三种输出透射率情况下激光器的输出性能。结果表明, 当透射率为 5% 时斜率效率最高。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 二极管抽运; Tm:YAP

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.021401

## Influence of Thulium Ion Concentration and Output Transmittance on Tm:YAP Laser Performance

Li Hongshu Zhao Ming Xu Wenhai

(College of Information Science Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

**Abstract** The influence of thulium ion concentration and output-mirror transmittance on Tm:YAP crystal laser output performance is experimentally investigated. Three  $c$ -cut crystals in size of  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  with 3%, 4% and 5% Tm<sup>3+</sup> (ionic-number fraction) are examined with the transmittance of 5%. Experimental results showed that the best power performance is obtained with the 4% Tm:YAP crystal. By using 24.8 W incident pump power, a maximum output power of 7.5 W is obtained. The slope efficiency is 48.8%. Using different output transmittances of 2%, 5% and 10%, we investigate the laser performance with 4% thulium ion. The results show that with the transmittance of 5%, the highest slope efficiency is obtained.

**Key words** lasers; solid-state lasers; diode-pumped; Tm:YAP

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.5680; 140.3070

## 1 引言

对于  $2\text{ }\mu\text{m}$  波段的激光, 由于水汽对其吸收较强<sup>[1]</sup>, 并具有人眼安全的光谱范围<sup>[2]</sup>, 使得输出波长在  $2\text{ }\mu\text{m}$  附近的固体激光器在医学、大气传感和空间光通信等方面有着巨大的研究前景<sup>[3]</sup>。掺杂铥(Tm<sup>3+</sup>)离子的固体激光介质被普遍用于获得  $2\text{ }\mu\text{m}$  附近的激光振荡。Tm<sup>3+</sup> 离子在 800 nm 附近吸收较强, 适合于商用光纤耦合输出激光二极管(LD)来高效抽运<sup>[4~6]</sup>。因此, 近年来掺 Tm<sup>3+</sup> 激光器引起了人们的广泛关注。在基质材料中, 铝酸钇晶体(YAlO<sub>3</sub>, YAP)是常用的激光基质, 它是一种斜方晶体空间群的双轴晶体<sup>[7,8]</sup>, 具有优良的导热率、机械性能和自然双折射性<sup>[9]</sup>, 适合作为高功率固体激光材料。Tm:YAP 激光器的输出波长可以实现从  $1.8\text{ }\mu\text{m}$  到  $2.0\text{ }\mu\text{m}$  的范围内连续可调谐。目前已经展开了大量的研究来探讨 Tm:YAP 晶体的光谱和激光器性能的影响因素。Tm<sup>3+</sup> 离子的掺杂浓度和输出耦合镜的透射率是影响 Tm:YAP 激光器输

**收稿日期**: 2012-09-14; **收到修改稿日期**: 2012-10-20; **网络出版日期**: 2013-01-04

**基金项目**: 中央高校基本科研业务费专项资金(2012DT006)资助课题。

**作者简介**: 李红姝(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事激光技术及应用等方面的研究。E-mail: lihongshu@dmlu.edu.cn

**导师简介**: 许文海(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水下探测、光电检测与光电信息等方面的研究。

E-mail: whxu@dmlu.edu.cn

出性能的两个关键因素。本文通过实验研究了  $c$  切割的  $\text{Tm}:\text{YAP}$  激光器在不同离子掺杂浓度和不同输出透射率下的性能。

## 2 理论分析

800 nm 激光抽运的单掺  $\text{Tm}$  激光器是准三能级系统,可以看作是介于三能级系统和四能级系统之间的一种激光系统,它的特点是激光终态能级位于稀土激活粒子基态 Stark 能级上<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,在  $\text{Tm}$  激光器中,粒子被激发到  $^3\text{H}_4$  态以后,由于自发辐射和横向弛豫的作用, $\text{Tm}^{3+}$  离子将回到较低能级  $^3\text{F}_4$  态,即  $^3\text{H}_4 + ^3\text{H}_6 = 2^3\text{F}_4$  过程。该过程的效率取决于横向弛豫速率和自发辐射效率。横向弛豫速率是由  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂浓度和相互作用的  $\text{Tm}^{3+}$  的平均距离所决定的。

根据  $\text{Tm}$  系统的能级跃迁图, $\text{Tm}$  系统的速率方程可以写为

$$\frac{dN_4}{dt} = R_p - k_{42}N_4N_1 + k_{224}N_2^2 - \frac{N_4}{\tau_4}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = 2k_{423}N_4N_2 + k_{223}N_2^2 - \frac{N_3}{\tau_3}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 2k_{42}N_4N_1 - 2(k_{223} + k_{224})N_2^2 - \frac{N_2}{\tau_2} + \frac{N_3}{\tau_3} - \sigma \frac{c}{n}(f_u N_2 - f_l N_1)\Phi, \quad (3)$$

$$N_1 = N_0 - N_2 - N_3 - N_4, \quad (4)$$

式中  $R_p$  表示抽运速率,是由于抽运作用造成的  $^3\text{H}_4$  态粒子数增加; $k$ 、 $N$  和  $\tau$  分别为辐射(跃迁)概率、粒子浓度和光子寿命; $N_0$  为激光工作物质中的离子掺杂浓度; $f_u$ 、 $f_l$  分别为粒子在激光上下多重态能级的概率分布,它符合玻尔兹曼统计规律; $\sigma$  为受激发射截面, $\phi$  为光子密度。(1)式右边第二项表示横向弛豫造成的  $^3\text{H}_4$  态粒子数减少;第三项代表由于上变频效应使  $^3\text{H}_4$  态增加的粒子数;最后一项表示由于自发辐射所带来的粒子数减少。对于(3)式右边最后一项来说,用  $N_u$ 、 $N_l$  分别代表多重态 Stark 能级中激光上下能级的粒子数密度,粒子数反转密度可以表示为

$$\Delta N = N_u - N_l = f_u N_2 - f_l N_1 = (f_u + f_l)N_2 - f_l N_0. \quad (5)$$

激光谐振腔中,光与物质作用的关系式可表示为

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\sigma c}{n} \cdot \frac{nl}{l_0} \cdot \Delta N \Phi - \frac{\Phi}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{\Delta N}{\Delta N_{th}} - 1 \right) \Phi, \quad (6)$$

式中  $n$  是激光工作物质的折射率, $l_0$  为激光腔的光学长度, $l$  为激光工作物质的长度。光子在谐振腔内的寿命  $\tau_c = \frac{2l}{c(L+T)}$ ,其中  $T$  是输出反射镜的透射率, $\Delta N_{th}$  是激光器的阈值反转粒子数密度, $L$  为损耗(包括输出损耗), $L = 2\delta$ , $\delta$  表示光在谐振腔内往返一次的损耗,它强烈依赖于  $\text{Tm}^{3+}$  离子的浓度。

激光器的输出功率为

$$P = ATI_+ = \frac{1}{2}ATI_s(\nu) \left[ \frac{g_H^0(\nu)}{\delta} - 1 \right], \quad (7)$$

式中  $A$  为激光束的有效截面积, $I_+$  为腔内沿腔轴方向传播的光强, $\Delta n_t$  为粒子数密度反转阈值;激光器必须吸收的抽运功率即激光器的阈值抽运功率为  $P_{pt} = \frac{h\nu_p \Delta n_t V}{\eta_F \tau_{s2}} = \frac{h\nu_p \delta V}{\eta_F \sigma_{21}(\nu, \nu_0) \tau_{s2} l}$ ,式中  $V$  为工作物质体积, $\nu_p$  为抽运光频率, $\eta_F$  为抽运效率, $\tau_{s2}$  为  $E_2$  能级寿命;频率为  $\nu$  的光对应的饱和光强  $I_s(\nu) = \frac{h\nu}{\sigma_{21}(\nu, \nu_0) \tau_2}$ 。对于光

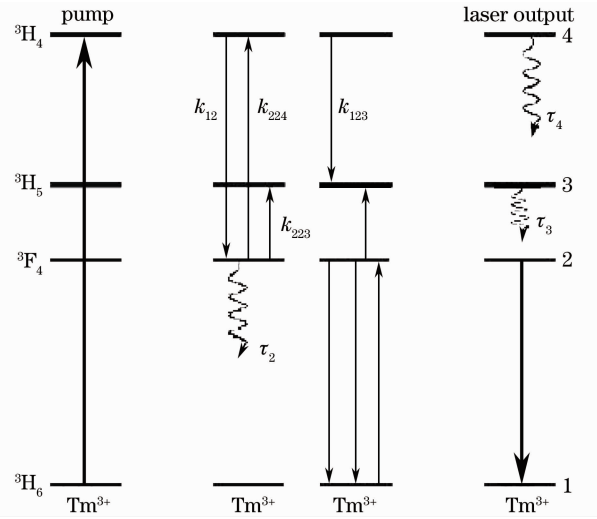


图 1  $\text{Tm}$  系统能级结构

Fig. 1  $\text{Tm}$  energy levels

抽运激光器,  $\frac{g_H^0(\nu)}{g_t} = \frac{P_p}{P_{pt}}$  ( $g_t$  为激光器振荡阈值), 代入后得

$$P = \frac{\nu_0 A}{\nu S} \eta_0 \eta_l P_{pt} \left( \frac{P_p}{P_{pt}} - 1 \right), \quad (8)$$

式中  $P_p$  及  $P_{pt}$  分别为工作物质吸收的抽运功率和阈值吸收抽运功率,  $S$  为工作物质的截面积,  $\eta_0$  表征谐振腔内激光功率转化为输出激光功率的转换效率,  $\eta_l$  为  $E_3$  能级至  $E_2$  能级的无辐射跃迁效率。由此, 激光器的输出功率可以表示为抽运吸收功率的函数。

### 3 实验装置

光纤耦合输出激光二极管抽运的 Tm:YAP 激光器装置原理图如图2所示。Tm 离子的离子数分数分别为 3%、4%、5%, 沿  $c$  轴切割, 尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 两端镀有  $795 \text{ nm}$  和  $1.94 \mu\text{m}$  高透膜。Tm:YAP 晶体用铝箔包裹, 并安装在水冷的铜质散热器中, 水温为  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。抽运源是  $795 \text{ nm}$  的光纤耦合输出激光二极管, 尾纤芯径为  $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径为  $0.22$ 。实验中抽运光斑的直径约为  $400 \mu\text{m}$ 。激光谐振腔由  $1.94 \mu\text{m}$  高反射 ( $R > 99.7\%$ ) 且  $795 \text{ nm}$  高透 ( $T > 97\%$ ) 的平面镜 M1 以及曲率半径为  $200 \text{ mm}$  的平凹输出镜 M2 组成。整个谐振腔的物理长度约为  $30 \text{ mm}$ 。平面镜 M3 作为二向色镜, 镀有  $795 \text{ nm}$  高反且  $1.94 \mu\text{m}$  高透的介质膜。

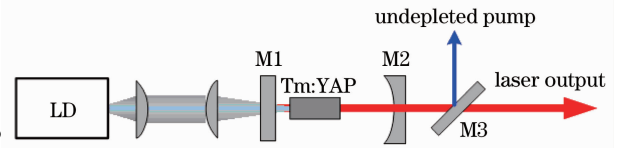


图2 激光器装置

Fig.2 Schematic of the laser setup

### 4 实验结果及分析

首先在实验上研究了掺杂浓度对 Tm:YAP 激光器输出性能的影响。Tm<sup>3+</sup> 离子数分数分别为 3%、4% 和 5%, 在输出耦合器的透射率为 5% 情况下的输出特性如图3所示。

从实验结果可以看出, 掺杂离子数分数为 4% 时达到最高的斜率效率  $48.8\%$ , 此时的阈值抽运功率为  $4.8 \text{ W}$ 。当抽运功率为  $24.8 \text{ W}$  时, 激光器的最大输出功率为  $7.5 \text{ W}$ 。当掺杂离子数分数为 3% 时, 激光器阈值为  $6.5 \text{ W}$ , 当抽运功率为  $24.8 \text{ W}$  时输出功率为  $5.9 \text{ W}$ , 斜率效率为  $39.6\%$ 。当掺杂离子数分数为 5% 时, 抽运功率为  $24.8 \text{ W}$  时输出功率为  $6.0 \text{ W}$ , 斜率效率为  $36.8\%$ 。实验结果表明, 4% 掺杂离子数分数的 Tm:YAP 晶体与 3% 和 5% 的相比, 斜率效率较高, 阈值较低。

根据理论分析, 激光器的输出功率还和输出反射镜的透射率  $T$  有关。如图4所示, 当  $T$  增大时, 一方面提高了透射光的比例, 有利于提高输出功率, 同时却又使阈值增加, 从而导致腔内光强下降。图中 a 指往返净损耗率。

为此, 使用掺杂离子数分数为 4% 的 Tm:YAP 激光器实验研究了 2%、5% 和 10% 三种输出透射率下的输出性能。由于 Tm:YAP 晶体的热效应较为严重, 在高抽运强度下容易发生脆裂, 出于保护实验器件的目的, 在进行透射率影响研究时降低了抽运功率水平。Tm:YAP 激光器的输出特性如图5所示。三种输出透射率情况下, 激光器的阈值抽运功率相近, 都在  $1.9 \text{ W}$ 。透射率为 5% 时, 激光器的斜率效率最大, 达到  $44.1\%$ , 当吸收抽运功率为  $10.2 \text{ W}$  时, 相应的最大输出功率为  $3.6 \text{ W}$ , 转换效率为  $35.3\%$ 。透射率为 2% 时, 当吸收抽运功率为  $10.2 \text{ W}$  时, 输出功率为  $2.9 \text{ W}$ 。斜率效率为  $35.4\%$ , 相应的转化效率为  $28.4\%$ 。透射率为 10% 时, 在吸收抽运功率相同时, 获得输出功率  $3.4 \text{ W}$ , 相应的斜率效率为  $40.6\%$ , 转换效率为  $33.3\%$ 。

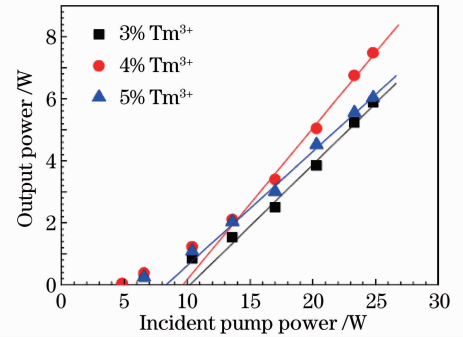


图3 离子数分数分别为 3%、4%、5% 的 Tm:YAP 激光器的输出功率

Fig.3 Output power of Tm:YAP lasers with Tm<sup>3+</sup> ion concentrations of 3%, 4% and 5%

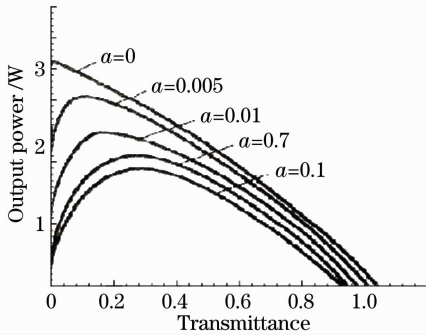


图4 输出功率与透射率的关系

Fig. 4 Relation between output power and transmittance

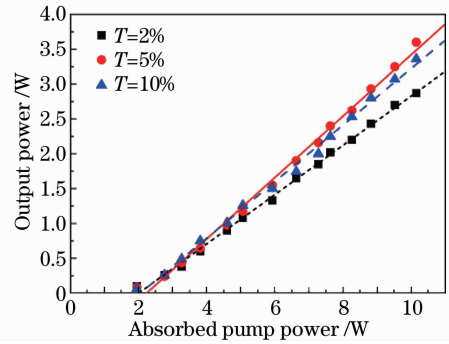


图5 透射率分别为2%、5%、10%的Tm:YAP激光器的输出功率

Fig. 5 Output power of Tm:YAP laser with the output transmittances of 2%, 5% and 10%

实验结果显示,透射率为5%时,Tm:YAP晶体激光器所获得的斜率效率最好。正如理论分析得出的结论,激光器的输出功率与输出反射镜的透射率有关,当透射率增大时,提高了透射光的比例,有利于提高输出功率,但是同时阈值也增加了,从而导致腔内光强下降。因此存在一个使输出功率达到极大值的最佳透射率。

## 5 结 论

在实验上研究了掺杂浓度和输出透射率对Tm:YAP激光器输出性能的影响。Tm<sup>3+</sup>离子数分数为4%的Tm:YAP晶体的功率性能最好,当抽运功率为24.8 W时,连续输出功率最大为7.5 W,斜率效率为48.8%。当透射率为5%,Tm:YAP激光器获得了最高的斜率效率。

## 参 考 文 献

- 1 J. A. Curcio, C. C. Petty. The near infrared absorption spectrum of liquid water[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, **41**(5): 302~304
- 2 H. Yang. Polycrystalline Ho:YAG transparent ceramics for eye-safe solid state laser applications[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2012, **95**(1): 52~55
- 3 R. C. Stoneman, L. Esterowitz. Efficient 1.94  $\mu\text{m}$  Tm:YAIO laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1995, **1**(1): 78~81
- 4 Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of 2  $\mu\text{m}$  all-solid-state lasers[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 20~24  
赵媛媛, 侯霞, 陈卫标. 2  $\mu\text{m}$  全固态激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 20~24
- 5 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702006  
魏磊, 肖磊, 韩隆等. Tm:YAP激光抽运ZGP晶体光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702006
- 6 Yang Xiaotao, Ma Xiuzhen, Liu You. High-energy LD side-pumped Q-switched air cooling Nd:YAG laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 111405  
杨晓涛, 马修真, 刘友. 高能激光二极管侧面抽运风冷Nd:YAG脉冲激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 111405
- 7 Xin Yun, Ye Bing, Fang Wanli. Application and development of holmium laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**: 040003  
欣云, 叶兵, 方万里. 钬激光应用与进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040003
- 8 Li Xiang, Wang Jiangfeng, Li Xuechun *et al.*. Laser diode pumped cryogenic cloed Yb:YAG regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102010  
李响, 王江峰, 李学春等. 激光二极管抽运低温Yb:YAG再生放大器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102010
- 9 Wei Lei, Hu Xuehao, Han Long *et al.*. Laser diode-dual-end-pumped Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502005  
魏磊, 胡学浩, 韩隆等. 激光二极管双端抽运Tm:YAP激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502005
- 10 Li Yufeng. Study of Diode Pumped Tm Doped Solid State Lasers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008  
李玉峰. 二极管泵浦单掺Tm固体激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008