

文章编号: 0258-7025(2009)05-1037-05

# 高平均功率室温运转闪光灯抽运 Cr : Tm : Ho : YAG 激光器

龙井宇<sup>1</sup> 刘沛沛<sup>1</sup> 杨 凯<sup>1</sup> 郑新亮<sup>1,2</sup> 任兆玉<sup>1,3</sup> 白晋涛<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>西北大学光子学与光子技术研究所 陕西省光电子技术重点实验室, 陕西 西安 710069  
<sup>2</sup>西北大学物理系, 陕西 西安 710069  
<sup>3</sup>陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 陕西 西安 710069

**摘要** 报道了氙灯抽运的 2.1  $\mu\text{m}$  Cr : Tm : Ho : YAG 激光器。室温下 Cr : Tm : Ho : YAG 为准三能级系统, 振荡阈值高, 掺杂离子间存在复杂的能量转移过程。采用优化掺杂浓度配比的激光晶体, 长脉冲抽运, 实现了室温下 2.1  $\mu\text{m}$  波长激光输出。采用了高漫反射陶瓷聚光腔, 对有效抽运光谱带的反射率高达 95%。冷却水温 15  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 重复频率 10 Hz, 获得最大平均功率 23.5 W; 重复频率 5 Hz, 获得最大激光脉冲能量 2.58 J, 最大斜率效率 4.3%。  
**关键词** 激光技术; Cr : Tm : Ho : YAG 激光器; 氙灯抽运; 准三能级

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1037

## High Average Power Flashlamp-Pumped Cr : Tm : Ho : YAG Laser at Room Temperature

Long Jingyu<sup>1</sup> Liu Peipei<sup>1</sup> Yang Kai<sup>1</sup> Zheng Xinliang<sup>1,2</sup>  
Ren Zhaoyu<sup>1,3</sup> Bai Jintao<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Photonics and Photo-Technology, Northwest University, Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Xi'an, Shaanxi 710069, China*  
<sup>2</sup>*Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China*  
<sup>3</sup>*Shaanxi Engineering Technology Research Center for All Solid State Laser and Application, Xi'an, Shaanxi 710069, China*

**Abstract** A xenon flashlamp-pumped Cr : Tm : Ho : YAG laser operating at 2.1  $\mu\text{m}$  is demonstrated. Since the Cr : Tm : Ho : YAG has a high threshold owing to its quasi-three-level nature and the complex energy transfer process between the doped ions, optimum ions concentration proportion and long pulse pumping are employed to achieve the 2.1- $\mu\text{m}$  laser operating at room temperature. The ceramic pumping cavity with high diffuse reflectivity of 95% for effective pump band is used. With the cooling water temperature of 15  $^{\circ}\text{C}$ , the maximum laser average power is 23.5 W at 10-Hz repetition frequency, and the maximum laser pulse energy is 2.58 J with a maximum slope efficiency of 4.3% at 5 Hz.

**Key words** laser technique; Cr : Tm : Ho : YAG laser; xenon-lamp pump; quasi-three-level

## 1 引 言

三价稀土离子  $\text{Ho}^{3+}$  的能级跃迁<sup>5</sup>  $I_7 \rightarrow I_8$  可以

发射波长约 2.1  $\mu\text{m}$  的激光辐射, 独特的对水吸收、大气传输和对人眼安全特性使该波长激光器应用于

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-11-05

基金项目: 陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心(ZDGC-19)资助项目。

作者简介: 龙井宇(1979-)男, 博士研究生 主要从事全固态激光器理论及技术的研究。E-mail: jylong532@sina.com

导师简介: 白晋涛(1959-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率全固态(包括光纤)激光器及超短脉冲激光器的理论与实验研究工作。E-mail: baijt@nwu.edu.cn

诸如遥感、医疗、军事等许多现代技术领域<sup>[1~3]</sup>。由于  $\text{Ho}^{3+}$  室温下固有的准三能级特征,早期的  $\text{Ho}$  激光只能在液氮温度下工作(约 77 K)<sup>[4~6]</sup>。后来通过引入  $\text{Cr-Tm}$  离子敏化机制,显著提高了闪光灯抽运效率,实现了  $\text{Ho}$  激光的室温运转<sup>[7]</sup>。1990 年以来,国际上对  $\text{Ho}$  激光基质材料、掺杂浓度和激光外部参数的优化开展了深入研究,从石榴石类晶体(YAG, GSGG, YSAG, GSAG, YSGG 等)精选出 YAG 作为  $\text{Ho}$  激光的最佳工作基质,激光效率获得了实质性的提升<sup>[8]</sup>。 $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  的能量特性已经接近性能优异、应用广泛的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器。然而,抽运光子与激光光子较大的能量差异及敏化离子与发光离子间复杂的能量传递过程都使得  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  比  $\text{Nd}:\text{YAG}$  有更高的热负载和较低的抽运效率。尤其是在高重复频率抽运时,热效应严重制约了激光器的抽运效率和稳定工作。为了满足某些外科手术应用(包括切骨术、硬组织烧融和结石碎裂等)对  $\text{Ho}$  激光的高平均功率室温运转提出的要求<sup>[9]</sup>,国内外开展了重复频率抽运  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  激光器的研制<sup>[10,11]</sup>。本文理论分析了  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  晶体掺杂浓度的最佳化问题,进行了优化谐振腔参数和抽运脉冲宽度的实验研究,在对激光系统有效地进行热处理的基础上,实现了氙灯抽运  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  激光器高平均功率室温运转。

## 2 $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$ 的抽运机制

$\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  的能级结构和跃迁过程如图 1 所示。 $\text{Cr}^{3+}$  的宽吸收带<sup>4</sup> $T_1$  和<sup>4</sup> $T_2$  吸收氙灯抽运能量,通过无辐射衰变跃迁至能带<sup>4</sup> $T_2$  和<sup>2</sup> $E$ ,接着以偶极子-偶极子相互作用,激发态转移至  $\text{Tm}^{3+}$  的<sup>3</sup> $F_3$  和<sup>3</sup> $H_4$  能级。而无辐射衰变将所有的激发态  $\text{Tm}^{3+}$  置于<sup>3</sup> $H_4$  能级。每个激发态  $\text{Tm}^{3+}$  与一个基态<sup>3</sup> $H_6$   $\text{Tm}^{3+}$  相互作用,产生两个激发态<sup>3</sup> $F_4$  能级  $\text{Tm}^{3+}$ ,即交叉弛豫过程。最终, $\text{Tm}^{3+}$  将能量转移到激发态<sup>5</sup> $I_7$   $\text{Ho}^{3+}$ , $2.1\ \mu\text{m}$  激光跃迁发生在  $\text{Ho}^{3+}$  <sup>5</sup> $I_7 \rightarrow$  <sup>5</sup> $I_8$  能级。 $\text{Cr}^{3+}$  的<sup>2</sup> $E$  能带( $14535\ \text{cm}^{-1}$ )与  $\text{Tm}^{3+}$  的<sup>3</sup> $F_3$  能级( $14487\ \text{cm}^{-1}$ )间是近共振转移,而<sup>2</sup> $E$  能带向  $\text{Cr}^{3+}$  的基态的跃迁是自旋禁戒的( $\text{Cr}^{3+}$  的<sup>2</sup> $E$  的荧光寿命约为 1.8 ms),这些保证了  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  高效的能量转移<sup>[8]</sup>。

## 3 掺杂浓度优化的理论分析

$\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度的优化考虑三方面的要求<sup>[8]</sup>,对

抽运光更大的有效吸收,对抽运光均匀的沉积分布,更大的  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  能量转移效率。选择  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度  $N$ ,使得激光棒轴的功率沉积最大,棒直径为  $d$ ,对抽运光有效吸收截面为  $\sigma_{\text{eff}}$ ,最优化  $N$  值近似为  $N = (\sigma_{\text{eff}} d)^{-1}$ ,这里

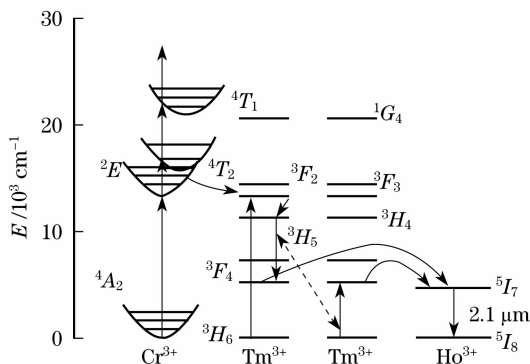


图 1  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$  的能级结构

Fig. 1 Energy level diagram for  $\text{Cr}:\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YAG}$

$$\sigma_{\text{eff}} \approx \frac{\int \sigma(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中  $E(\lambda)$  为脉冲氙灯的输出光谱函数,积分限制在  $\text{Cr}^{3+}$  的吸收谱带<sup>4</sup> $T_1$  和<sup>4</sup> $T_2$  的波长范围。利用实验值  $\sigma_{\text{eff}} = 3.75 \times 10^{20}\ \text{cm}^2$ ,棒直径 5 mm 时,最优化的  $N$  值为  $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 。此外考虑  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  能量转移效率,表 1<sup>[8]</sup> 给出了在 YAG 晶体中  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  能量转移效率与  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度的关系。可以看出,当选择  $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$  或更小的  $N$  值时不会显著降低  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  能量转移效率。

表 1  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  能量转移效率与  $\text{Cr}^{3+}$  掺杂浓度的关系

Table 1 Relationship between  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Tm}^{3+}$  transfer efficiency and  $\text{Cr}^{3+}$  concentration

$\text{Cr}^{3+}$ concentration / $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$	Transfer efficiency / %
2.50	98.7
0.92	96.2
0.77	95.4
0.46	94.8

$$C(\text{Tm}^{3+}) = 8.0 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$$

$\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂浓度的选择涉及  $\text{Tm}^{3+}$  的交叉弛豫和  $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$  的能量转移效率。 $\text{Tm}^{3+}$  浓度较高时,交叉弛豫几率较大,有利于产生<sup>3</sup> $F_4$  态  $\text{Tm}^{3+}$  离子。相对于能级寿命(约 10 ms),发生在  $\text{Tm}^{3+}$  的<sup>3</sup> $F_4$  能级和  $\text{Ho}^{3+}$  <sup>5</sup> $I_7$  能级之间的  $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$  能量转移速率足够快(约  $20\ \mu\text{s}$ ), $\text{Tm}-\text{Ho}$  激发态能级可以看作耦合能级,其粒子数满足玻尔兹

曼分布,能量转移效率可以表示为<sup>[12,13]</sup>

$$f_{\text{Ho}} = \frac{N_{\text{Ho}} \sum_i g_i \exp\left(\frac{-E_i}{kt}\right)}{N_{\text{Ho}} \sum_i g_i \exp\left(\frac{-E_i}{kt}\right) + N_{\text{Tm}} \sum_j g_j \exp\left(\frac{-E_j}{kt}\right)}, \quad (2)$$

式中  $i$  和  $j$  的求和遍及  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  的斯塔克能级,  $g_i$  和  $g_j$  为简并因子,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $t$  为温度。  $N_{\text{Ho}}$  和  $N_{\text{Tm}}$  为 Ho 和 Tm 的掺杂浓度。可见, 特定的 Tm 浓度和温度下, 更高的 Ho 浓度可以提高能量转移效率。此外, Tm 和 Ho 之间存在能量传递上转换作用, 上转换 (UC) 作用消耗了  $\text{Ho}^{3+}$  上激光能级, 从而影响储能效率。在 Tm : Ho : YAG 晶体中, 当 Tm 的掺杂浓度在  $(0 \sim 8.0) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时, 上转换速率线性依赖于 Tm 的浓度; 而当 Ho 的掺杂浓度在  $0 \sim 2.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  时, 上转换速率与 Ho 的浓度无关<sup>[14]</sup>。综合以上分析, 选择 Cr : Tm : Ho : YAG 晶体掺杂浓度为 Cr:  $0.55 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , Tm:  $8.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , Ho:  $0.97 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

## 4 实验结果和讨论

实验选取的 Cr : Tm : Ho : YAG 激光棒尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ , 两端镀  $2.094 \mu\text{m}$  增透膜。脉冲氙灯放电弧长  $105 \text{ mm}$ , 内径  $6 \text{ mm}$ 。实验采用单灯抽运。抽运脉冲电源电压  $V$  连续可调, 最大电压  $820 \text{ V}$ , 放电电容  $C = 750 \mu\text{F}$ , 放电回路可提供给氙灯最大  $250 \text{ J}$  的注入能量。电源提供给氙灯的单脉冲能量可以按照  $E_{\text{in}} = 1/2 CV^2$  计算。脉冲宽度在  $200 \sim 800 \mu\text{s}$  可调, 支持单脉冲和多种重复频率工作。聚光腔采用高漫反射陶瓷腔, 对  $400 \sim 600 \text{ nm}$  波长有效抽运带的反射率高达  $95\%$  以上。采用压缩机冷却的去离子水冷却激光棒和氙灯, 保证系统在室温工作。为了尽量降低空气中水蒸气吸收和散射造成的损耗, 采用了可能的最短腔长为  $260 \text{ mm}$ 。

实验比较了三种不同全反镜曲率半径情形下的输出能量差异, 结果如图 2 所示。可以看出采用平凹腔 ( $R = 1000 \text{ mm}$ ) 和平平腔的阈值和斜率效率较接近, 两者的输出能量明显高于平凸腔 ( $R = -1000 \text{ mm}$ )。根据文献<sup>[15]</sup>给出的 Cr : Tm : Ho : YAG 热透镜焦距实验值, 理论计算表明, 上述三种腔型均处在稳定区范围内, 而平凸腔的工作点更趋近非稳定区, 平平腔次之, 因此平凹腔阈值最低, 可以获得更大的输出能量。

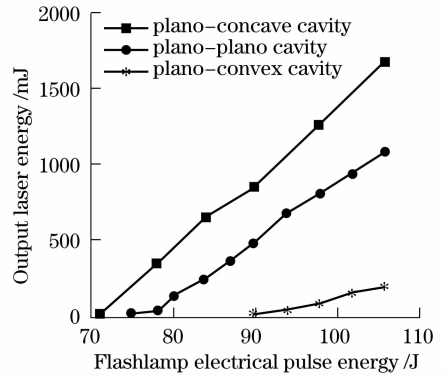


图 2 谐振腔镜曲率不同时  $2.1 \mu\text{m}$  激光输出能量随输入抽运能量的变化关系

Fig. 2 Output  $2.1\text{-}\mu\text{m}$  laser energy versus input pump energy at various resonator mirror curvatures

图 3 给出了采用  $10\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$  三种输出镜透过率的实验结果。可以看出, Cr : Tm : Ho : YAG 作为准三能级系统, 输出镜透过率的变化对阈值的影响不明显<sup>[16]</sup> (分别为  $75 \text{ J}$ ,  $75 \text{ J}$ ,  $80 \text{ J}$ )。  $T = 30\%$  时, 较高的阈值被较高的透过率所补偿, 使得它与采用  $20\%$  输出镜获得的斜率效率接近。此外, 由于输出能量作为输出镜透过率的函数为单极值函数<sup>[16]</sup>, 根据实验结果容易推论, 最佳的输出耦合率在  $10\% \sim 30\%$  之间。

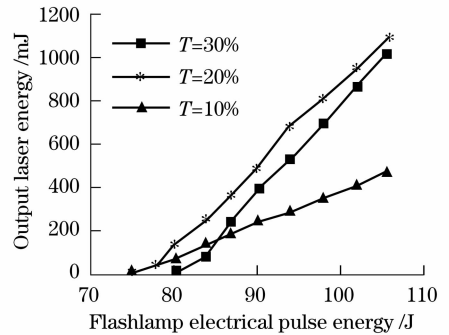


图 3 输出镜透过率不同时  $2.1 \mu\text{m}$  激光输出能量随输入抽运能量的变化关系

Fig. 3 Output  $2.1\text{-}\mu\text{m}$  laser energy versus input pump energy at various transmissivities

实验测量了冷却水温度  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $17.5 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时的激光输出随抽运能量的变化。由图 4 结果看出, Cr : Tm : Ho : YAG 的输出能量敏感地依赖于温度, 水温越低, 阈值越低, 相同抽运能量时的输出激光能量明显增大。此现象可以基于两种机制给予解释, 首先 Cr : Tm : Ho : YAG 的上激光能级位于  $^5 I_7$  能级斯塔克能级较低的子能级; 而其下激光能级位于  $^5 I_8$  能级斯塔克分裂能级较高的子能级, 所以温度越低, 越有利于上激光能级的集居和下激光能

级的抽空而使得阈值降低,输出能量显著提升。此外,温度越低,激光棒上的热负载越小,依赖于温度的热焦距的变化使得谐振腔的动态工作区域发生变化,这一因素也可能导致谐振腔损耗降低<sup>[17]</sup>。

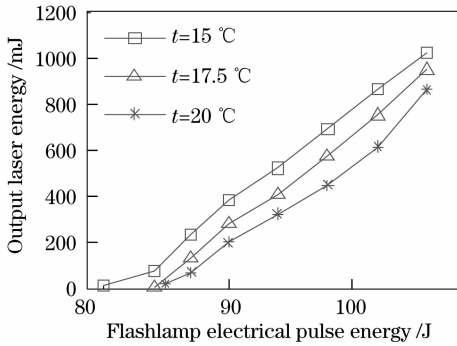


图4 不同温度下 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光输出能量随输入抽运能量的变化关系

Fig. 4 Output  $2.1\text{-}\mu\text{m}$  laser energy versus input pump energy at various temperatures

实验测量了抽运脉冲宽度分别为 $800\ \mu\text{s}$ ,  $600\ \mu\text{s}$ ,  $400\ \mu\text{s}$ 时的激光输出结果如图5所示。在 $800\ \mu\text{s}$ 时获得的输出能量最大,而采用 $600\ \mu\text{s}$ 和 $400\ \mu\text{s}$ 脉冲抽运时,输出能量分别下降了39%和73%。Cr : Tm : Ho : YAG中离子间能量传递过程复杂,而Ho的上激光能级寿命较长(约8 ms)<sup>[18]</sup>,抽运脉冲宽度越短,抽运功率密度越高,上转换速率尤其是Tm—Ho合作上转换速率越高<sup>[14]</sup>,降低了Ho上激光能级的有效储能,从而使阈值升高,斜率效率下降。所以,Cr : Tm : Ho : YAG激光器宜采用较长脉冲抽运。实验中,在抽运源能提供的最宽脉宽 $800\ \mu\text{s}$ 处获得了最大的斜率效率。有文献报道Cr : Tm : Ho : YAG激光器的最佳抽运脉宽在 $500\sim 600\ \mu\text{s}$ <sup>[19]</sup>,造成这种差异的原因可能是Cr : Tm : Ho;掺杂浓度和氙灯输出脉冲

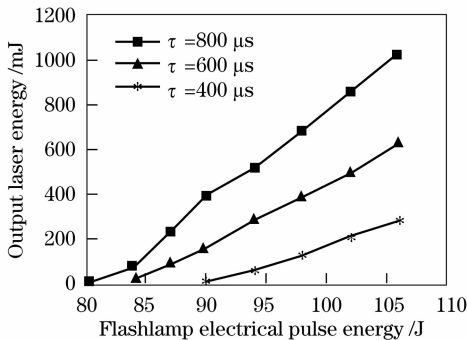


图5 不同抽运脉冲宽度时 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光输出能量随输入抽运能量的变化关系

Fig. 5 Output  $2.1\text{-}\mu\text{m}$  laser energy versus input pump energy at various pump pulse durations

波形的差别。由于实验条件的限制,氙灯脉冲波形的测量工作无法进行。

基于上述实验结果,采用腔长 $260\ \text{mm}$ 的平凹腔,输出镜透射率 $T=20\%$ ,抽运脉宽 $800\ \mu\text{s}$ ,冷却水温 $15\ ^\circ\text{C}$ ,实验比较了 $5\ \text{Hz}$ 和 $10\ \text{Hz}$ 两种重复频率时的激光输出特性,结果如图6所示。由于平均抽运功率增加1倍, $10\ \text{Hz}$ 抽运时的热负载更高,导致阈值略有升高,而斜率效率略有下降。但高的重复频率也使得激光平均输出功率大幅度提高,达到 $23.5\ \text{W}$ 。需要指出的是,由于实验室湿度较大,附着在谐振腔反射镜表面的水分吸收激光辐射会造成镜面局部温度过高,严重时损伤表面镀膜,激光振荡终止。实验中为防止膜损伤,抽运能量和重复频率分别限制在 $131\ \text{J}$ 和 $10\ \text{Hz}$ 以内。如果对激光头加装防尘罩,并采取干燥措施,激光输出能量和平均功率有进一步提高的潜力。

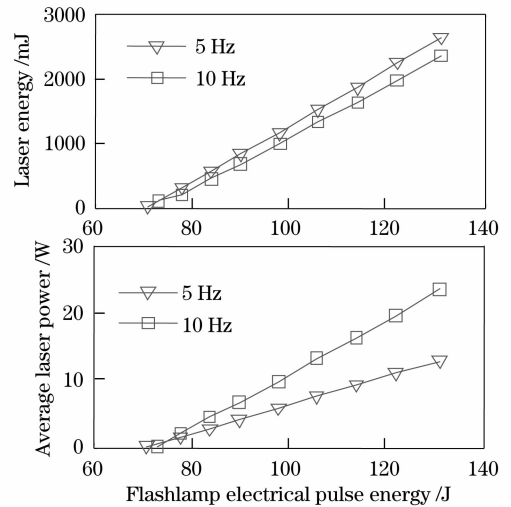


图6 不同抽运重复频率时 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光输出能量及平均功率随输入抽运能量的变化关系

Fig. 6 Output  $2.1\text{-}\mu\text{m}$  laser energy and average power versus input pump energy at various pump repetition frequencies

## 5 结 论

分析Cr : Tm : Ho : YAG准三能级特性的基础上,采用大流量去离子水冷却控温,通过对Cr : Tm : Ho : YAG晶体能量转移机理的分析,优化了Cr : Tm : Ho的掺杂浓度,实现了 $2.1\ \mu\text{m}$ 激光器的室温运转。采用 $800\ \mu\text{s}$ 长脉冲抽运, $T=20\%$ 输出镜,短腔长以减少腔内吸收损耗,抽运重复频率 $5\ \text{Hz}$ 时,获得最大单脉冲能量 $2.58\ \text{J}$ ,斜率效率 $4.3\%$ ,在抽运重复频率 $10\ \text{Hz}$ 时,获得最大平均输

输出功率 23.5 W。指出了采取干燥措施, 可以进一步提高输出平均功率。

### 参 考 文 献

- 1 Wu Chunting, Ju Youlun, Wang Zhenguo *et al.*. Laser diode-pumped Tm, Ho : YLF single-frequency laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):815~818  
吴春婷, 鞠有伦, 王振国等. 激光二极管抽运的 Tm, Ho : YLF 单模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):815~818
- 2 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pumped Tm : YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):181~185  
林志锋, 高明伟, 高春清. 激光二极管端面抽运 Tm : YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):181~185
- 3 Xie Gang, Peng Yuefeng, Lu Yanhua *et al.*. High efficiency 23.6 W 2  $\mu\text{m}$  laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1488~1491  
谢刚, 彭跃峰, 鲁燕华等. 23.6 W 高效率 2  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1488~1491
- 4 L. F. Johnson, J. E. Geusic, G. Van Uitert. Coherent oscillations from Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> ions in yttrium aluminum garnet [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**(5):127~129
- 5 L. F. Johnson, J. E. Geusic, G. Van Uitert. Efficient, high-power coherent emission from Ho<sup>3+</sup> ions in yttrium aluminum garnet assisted by energy transfer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **8**(8):200~202
- 6 Haim Lotem, Yehoshua Kalisky, Jacob Kagan. A 2  $\mu\text{m}$  holmium laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):1193~1200
- 7 B. M. Antipenko, V. A. Buchenkov, A. S. Glebov. Spectroscopy of YAG : CrTmHo laser crystals[J]. *Opt. Spectrosc. (USSR)*, 1988, **64**:772~774
- 8 Gregory J. Quarles, Annette Rosenbaum, Isaac D. Abella. Efficient room-temperature operation of Cr<sup>3+</sup>-sensitized, flashlamp-pumped, 2  $\mu\text{m}$  lasers [J]. *Optics and Quantum Electronics*, 1990, **22**:141~152
- 9 V. A. Bouchenkov, B. I. Utenkov. 10 W Ho-laser for surgery [C]. *SPIE*, 1991, **1410**:185~188
- 10 W. Zendzian, Z. Jankiewicz, J. K. Jabczynski. Performance investigation of lamp pumped pulsed Cr : Tm : Ho : YAG laser [C]. *SPIE*, 1996, **2772**:28~34
- 11 Chen Huimin, Liu Lei, Li Jiase. Experimental research of Cr : Tm : Ho : YAG in different frequency[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1):39~41  
陈慧敏, 刘磊, 李家泽. 重频 Cr : Tm : Ho : YAG 激光器输出特性的实验研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1):39~41
- 12 Brian M. Walsh, Norman P. Barnes, Baldassare Di Bartolo. The temperature dependence of energy transfer between the Tm <sup>3</sup>F<sub>4</sub> and Ho <sup>5</sup>I<sub>7</sub> manifolds of Tm-sensitized Ho luminescence in YAG and YLF[J]. *Journal of Luminescence*, 2000, **90**:39~48
- 13 Brian M. Walsh, Norman P. Barnes, Baldassare Di Bartolo. On the distribution of energy between the Tm <sup>3</sup>F<sub>4</sub> and Ho <sup>5</sup>I<sub>7</sub> manifolds in Tm-sensitized Ho luminescence [J]. *Journal of Luminescence*, 1997, **75**:89~98
- 14 Gunnar Rustad, Knut Stenersen. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(9):1645~1656.
- 15 S. D. Bowman. Short-pulse 2.1  $\mu\text{m}$  laser performance of Cr : Tm : Ho : YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(5):1129~1131.
- 16 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. 5th edition Beijing: World Publishing Corporation, 2005
- 17 Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high-alignment stability [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):107~117
- 18 Yao Yucheng, Li Zhenjia, Huang Chuyun *et al.*. Theoretical simulation of Cr : Tm : Ho : YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7):1351~1355  
姚育成, 李正佳, 黄楚云等. Cr : Tm : Ho : YAG 激光器的理论模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7):1351~1355
- 19 M. Skorczakowski, Z. Jankiewicz, Z. Misztur *et al.*. Investigation of laser action in holmium doped crystals [C]. *SPIE*, 1995, **2202**:92~97