

文章编号 1004-924X(2017)增-0020-06

## 激光介质长度对 Tm : YAG 激光器波长调谐的 理论分析与数值模拟

王彩丽<sup>1</sup>, 谢仕永<sup>1\*</sup>, 杜仕峰<sup>2</sup>, 刘 辉<sup>1</sup>, 许阳蕾<sup>1</sup>, 张 敬<sup>1</sup>, 许祖彦<sup>2</sup>

(1. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024;

2. 中国科学院 理化技术研究所 激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

**摘要:**从理论和实验两个方面,对比分析激光介质长度和晶体温度对侧面泵浦激光器泵浦阈值的影响,通过增加激光介质长度或改变晶体温度可实现激光输出波长从 2.02  $\mu\text{m}$  跳变到 2.07  $\mu\text{m}$ 。首次定量计算出侧面泵浦 Tm : YAG 激光器输出波长发生红移所对应的激光介质长度和晶体温度,如果输出耦合率固定为 5%,晶体温度为 281 K 时,当激光介质长度大于 85 mm 时,此时具有较小重吸收损耗的 2.07  $\mu\text{m}$  谱线会优先起振,激光器的波长为 2.07  $\mu\text{m}$ 。实验方面,当激光介质长度为 69 mm 时,Tm:YAG 激光器的输出波长为 2.02  $\mu\text{m}$ 。当激光介质长度为 138 mm 时,激光器的输出波长为 2.07  $\mu\text{m}$ ,实验结果和理论分析一致。

**关键词:**准三能级;泵浦阈值;波长调控;激光介质长度

中图分类号:TN248.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172513.0020

## Theoretical analysis and numerical simulation for wavelength switchable Tm : YAG laser modulated by Tm : YAG crystal length

WANG Cai-li<sup>1</sup>, XIE Shi-yong<sup>1\*</sup>, DU Shi-feng<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, XU Yang-lei<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, XU Zu-yan<sup>2</sup>

(1. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China;

2. Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

\* Corresponding author, E-mail: shiyong515@163.com

**Abstract:** Based on the analysis of quasi-three-level side pumped Tm : YAG laser system, the dependence of the laser wavelength was studied theoretically and experimentally, which shows central wavelength is switchable between 2.07 and 2.02  $\mu\text{m}$  with different Tm : YAG crystal lengths or rod temperatures. The length of the laser medium corresponding to the wavelength red shift was calculated quantitatively. The laser oscillation at 2.02  $\mu\text{m}$  with larger stimulated emission sections is suppressed when the crystal length is larger than  $\sim 85$  mm with a 5% output coupling, then an efficient side-diode-pumped rod Tm : YAG laser operating at 2.07  $\mu\text{m}$  is realized. The experimental results show that the wavelength of the single-module Tm : YAG laser with Tm : YAG crystal length of 69 mm is located at 2.02  $\mu\text{m}$ , while the wavelength of two-modules Tm : YAG laser with the total Tm : YAG crys-

收稿日期:2017-05-06;修订日期:2017-06-11.

基金项目:中国建筑材料科学研究总院前沿探索基金资助项目(No. YX-91)

tal length of 138 mm is located at 2.07  $\mu\text{m}$ . The experiments confirm the accuracy of the model.

**Key words:** quasi-three-level; pump threshold; wavelength switchable; length of laser medium

## 1 引 言

近年来,2  $\mu\text{m}$  波段激光器有了较快的发展,广泛应用于医疗手术、遥感探测及光通信等方面,还可作为 3~5  $\mu\text{m}$  波段光参量激光器的泵源<sup>[1-3]</sup>。目前,人们利用掺杂某些稀土离子(如  $\text{Tm}^{3+}$  或  $\text{Ho}^{3+}$ )的激光晶体来直接激励 2  $\mu\text{m}$  波段激光<sup>[4-6]</sup>。LD 泵浦单掺  $\text{Tm}^{3+}$  激光晶体只使用一种掺杂离子,且可以被商业化实用化的 785 或 808 nm 的高功率二极管阵列(Laser Diode, LD)泵浦,简化了系统的复杂性。而  $\text{Ho}^{3+}$  掺杂的激光系统由于需要一个 2  $\mu\text{m}$  的泵浦源,通常为  $\text{Tm}^{3+}$  激光器<sup>[7-8]</sup>。同  $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Ho}^{3+}$  共掺的激光器相比,单掺铽(Tm)激光器由于上转换机制和较长的上能级寿命,具有较好的应用前景<sup>[9]</sup>。在各种基质材料中,YAG 在 2  $\mu\text{m}$  波段的透明度好、自吸收系数小、热导率高,避免了基质本身的热效应,有利于激光器的高功率运行<sup>[10-11]</sup>。因此,Tm : YAG 晶体因具有方便的泵浦特性和良好的热性能而成为较理想的激光工作物质。

在  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂 YAG 晶体中,激光波长 2  $\mu\text{m}$  发生于 $^3\text{F}_4$ 的较高斯塔克能级与 $^3\text{H}_4$ 较低的斯塔克能级之间,其中 $^3\text{F}_4$ 最低能级( $5\ 556\ \text{cm}^{-1}$ )受激辐射到 $^3\text{H}_6$ 位于 $730\ \text{cm}^{-1}$ 的 Stark 能级产生 2.07  $\mu\text{m}$ 波长的激光,而从 $5\ 556\ \text{cm}^{-1}$ 受激辐射到 $^3\text{H}_6$ 的 $610\ \text{cm}^{-1}$  Stark 能级产生 2.02  $\mu\text{m}$ 波长的激光。关于高功率 Tm : YAG 激光器 2.02  $\mu\text{m}$  激光器的研究已有很多相关报道。E. C. Honnea 等人报道了 115 W 的二极管端面泵浦 Tm : YAG 激光器,输出波长为 2.01  $\mu\text{m}$ <sup>[12]</sup>。K. S. Lai 等人利用-10  $^\circ\text{C}$ 的水和甘油的混合物作为冷却剂,实现 150 W 2.02  $\mu\text{m}$  侧面泵浦棒状 Tm : YAG 激光输出<sup>[13]</sup>。D. Cao 等采用 783 nm LD 侧面泵浦掺杂物质质量浓度为 3.5%的 Tm : YAG 晶体,在晶体冷却温度 8  $^\circ\text{C}$ 的条件下,获得 200 W 的连续波 2.02  $\mu\text{m}$ 的激光输出<sup>[14]</sup>。

由于 2.07  $\mu\text{m}$  振荡模式具有较小的受激发射截面,关于 2.07  $\mu\text{m}$  Tm : YAG 激光器的报道

较少。R. C. Stoneman 等人采用双折射晶体进行波长调谐,获得了 280 mW、2.07  $\mu\text{m}$  的激光输出<sup>[15]</sup>。我们报道了波长可调谐的高功率 LD 侧面泵浦棒状 Tm : YAG 激光器,通过改变输出耦合率实现 Tm : YAG 激光器波长在 2.02  $\mu\text{m}$  与 2.07  $\mu\text{m}$  的调控,并且 2.07  $\mu\text{m}$  波长的输出功率达到 115 W<sup>[16]</sup>。后来,我们还报道了高功率的 LD 侧面泵浦 2.07  $\mu\text{m}$  Tm : YAG 激光器,在晶体冷却温度 8  $^\circ\text{C}$ 的条件下其输出功率达到 267 W<sup>[17]</sup>。

鉴于 2  $\mu\text{m}$  激光器在遥感、雷达以及作为 3~12  $\mu\text{m}$  激光器的泵浦源等方面的应用,2  $\mu\text{m}$  激光器不仅要有较高的输出功率,且其产生的波长在大气中应具有较高的透过率。2.01 和 2.02  $\mu\text{m}$  在大气中具有很多吸收线,其透过率较低,而波长为 2.07  $\mu\text{m}$  的激光在大气中恰好具有较好的透过率<sup>[18-19]</sup>,能够避开 GaAs 吸收带,减少 GaAs 等 OPO 晶体泵浦时的吸收损耗<sup>[20-21]</sup>。因此,波长为 2.07  $\mu\text{m}$  的高功率全固态 Tm : YAG 激光器在光电对抗等领域有着重要的应用价值。

为了使激光晶体发射的特定波长实现振荡,必须采取某些方法使该谱线具有较高的增益或使其它增益较强谱线的阈值高一些,通常的方法是在谐振腔内插入标准具、色散棱镜、使用镀有高度选择性介质膜的反射镜等,通过增大增益激光谱线的损耗,从而使该谱线的阈值相对较低。由于腔内插入过多元件会增加功率的损耗,而且增大调整难度,因此,研究调整谐振腔参数实现 Tm : YAG 激光器波长的调控具有重要的意义。M. J. D. Esser 等通过适当地选择输出耦合镜实现 Tm : GdVO<sub>4</sub> 激光器的波长调谐,实现了毫瓦级 1 818 nm 的激光输出<sup>[22]</sup>。我们报道了通过输出镜耦合率对侧面泵浦 Tm : YAG 激光器进行波长调控的理论及实验研究<sup>[23]</sup>。

本文考虑准三能级系统的重吸收损耗,基于侧面泵浦激光器泵浦阈值功率的理论模型,研究了激光介质长度对不同振荡模式阈值功率的影响,从而实现 Tm : YAG 激光器输出波长的调控。

## 2 Tm : YAG 激光器泵浦阈值理论分析

图 1 为 Tm : YAG 激光晶体的能级示意图, 785 nm 的泵浦光将  $\text{Tm}^{3+}$  从  $^3\text{H}_6$  基态转移到了 Tm 的  $^3\text{H}_4$  能级、离子  $^3\text{H}_4$  泵浦能级弛豫到上激光能级  $^3\text{F}_4$ , 激光作用发生在  $^3\text{F}_4$  能级和  $^3\text{H}_6$  能级之间, 输出波长大约为  $2\ \mu\text{m}$ , 其中由  $^3\text{F}_4$  最低能级  $5\ 556\ \text{cm}^{-1}$  受激辐射到  $^3\text{H}_6$  的  $730\ \text{cm}^{-1}$  斯塔克能级产生  $2.07\ \mu\text{m}$  波长, 由  $5\ 556\ \text{cm}^{-1}$  受激辐射到  $^3\text{H}_6$  的  $610\ \text{cm}^{-1}$  斯塔克能级产生  $2.02\ \mu\text{m}$  波长。与 Nd : YAG 激光器四能级系统不同, Tm : YAG 激光器系统激光终态能级上的粒子数不为零。因此, 激光输出波长会受到基态粒子重吸收损耗的影响。

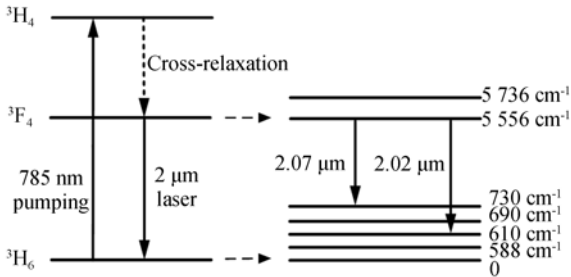


图 1 Tm : YAG 激光器能级分布

Fig. 1 Energy levels of Tm : YAG laser

基于侧面泵浦准三能级激光器系统, 不同谱线跃迁的泵浦功率密度阈值为<sup>[24-26]</sup>:

$$P_{\text{th,density},i} = \frac{h\nu_p(L_i + T_i + 2N_{a,i}^0\sigma_i l)}{2\tau_i\eta_i\sigma_i(f_{a,i} + f_b)}, \quad (1)$$

其中:  $h\nu_p$  为泵浦光子功率,  $w_p$  为泵浦光束腰半径,  $L_i$  为谐振腔固有损耗,  $T_i$  为输出耦合率,  $w_{s,i}$  为激光束腰半径,  $f_{a,i}$  为激光下能级粒子数占  $^3\text{H}_6$  多重态粒子总数的分数,  $f_b$  为激光上能级粒子数占  $^3\text{F}_4$  多重态粒子总数的分数,  $\sigma_i$  为激光的受激发射截面,  $\tau_i$  是  $^3\text{F}_4$  能级的荧光寿命,  $N_{a,i}^0$  激光下能级的粒子数密度,  $l$  为激光介质长度,  $\eta_i$  为上能态的效率, 表示激光跃迁时发射的功率与吸收的泵浦功率之比, 其表达式为  $\eta_i = \eta_{p,i} \times \eta_{s,i}$ ,  $\eta_{p,i}$  为泵浦量子效率,  $\eta_{s,i}$  为斯托克斯因子。假设  $2.02\ \mu\text{m}$  振荡模式为  $i=0$ ,  $2.07\ \mu\text{m}$  振荡模式为  $i=1$ 。

为了使  $2.07\ \mu\text{m}$  的振荡模式起振,  $2.07\ \mu\text{m}$

模式的吸收泵浦功率密度阈值小于  $2.02\ \mu\text{m}$  模式, 即:

$$P_{\text{th,density},1} < P_{\text{th,density},0}. \quad (2)$$

对于给定的谐振腔结构, 只要精确测量或计算出  $f_{a,1}$ ,  $f_{a,0}$ ,  $f_b$ ,  $N_{a,0}^0$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ ,  $\eta_p$ ,  $\eta_i$ , 就可以计算出振荡波长转换的发生条件。

对于掺杂浓度为 3.5% 的 Tm : YAG 激光器的基本数据, 计算参数为:  $N_{\text{Tm}} = 4.8 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ ,  $\lambda_p = 785\ \text{nm}$ ,  $\tau = 11\ \text{ms}$ ,  $\eta_i = 38.9\%$ ,  $\eta_p = 38.3\%$ ,  $\eta_b = 37.9\%$ ,  $\eta_s = 37.6\%$ ,  $\sigma_{2.02\ \mu\text{m}} = 2 \times 10^{-21}\ \text{cm}^2$ ,  $\sigma_{2.07\ \mu\text{m}} = 0.7 \times 10^{-21}\ \text{cm}^2$ 。把以上数据代入式(1), 并假设不考虑激光谐振腔的固有损耗, 当输出镜耦合率固定为 5%, 晶体温度为 281 K 时, 可以得到  $2.02\ \mu\text{m}$  和  $2.07\ \mu\text{m}$  振荡模式下吸收泵浦功率密度阈值与激光介质长度的关系曲线, 如图 2 所示。

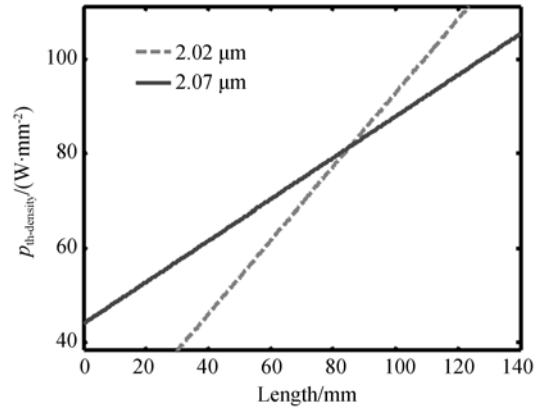


图 2  $2.02\ \mu\text{m}$  与  $2.07\ \mu\text{m}$  波长吸收泵浦功率密度阈值随激光介质长度的变化曲线

Fig. 2 Calculated absorbed threshold power density as a function of crystal length at  $2.02$  and  $2.07\ \mu\text{m}$

从图 2 可以看出, 当激光介质长度大于 85 mm 时, 重吸收损耗较小的  $2.07\ \mu\text{m}$  谱线会优先起振, Tm : YAG 激光器的波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ ; 当激光介质长度小于 85 mm 时, 发射截面较大的  $2.02\ \mu\text{m}$  谱线会优先起振, Tm : YAG 激光器的波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ 。实际情况下, 激光谐振腔内存在固有损耗, 激光器输出波长发生跃变对应的激光介质长度略大于 85 mm。

同一个多重态斯塔克能级间的无辐射弛豫速率远大于相邻多重态之间的跃迁速率, 则在稳态

泵浦时,各多重态斯塔克能级上的粒子数遵守玻尔兹曼分布。当输出耦合率为 5%,激光介质长度分别为 69,138 mm 时,泵浦功率密度阈值随晶体温度的变化曲线如图 3 所示。

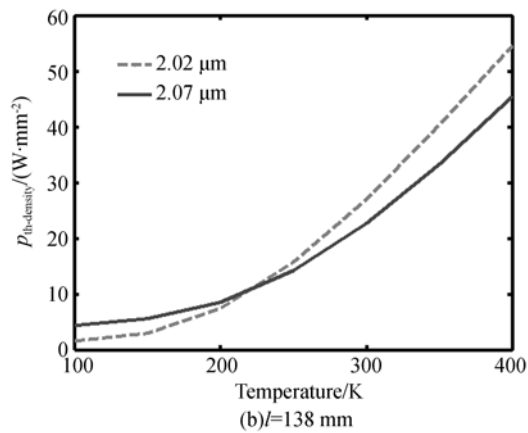
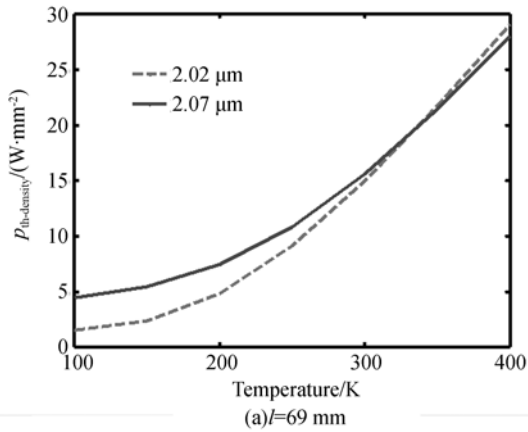


图 3 吸收泵浦功率密度阈值与晶体温度的关系曲线  
Fig. 3 Calculated Tm : YAG laser absorbed threshold power density as a function of temperature

不同谱线的泵浦阈值随着温度的升高而逐渐增加。当激光介质长度为 69 mm 时,晶体温度低于 332 K,2.02 μm 的阈值处于最低,而晶体温度高于 332 K,2.07 μm 的阈值处于最低;当激光介质长度为 138 mm 时,晶体温度低于 220 K,2.02 μm 的阈值处于最低,而晶体温度高于 220 K,2.07 μm 的阈值处于最低。

激光器腔内并未插入任何波长调谐元件,通过改变激光介质长度造成 Tm : YAG 激光器的激光波长会发生红移,原因是准三能级系统中存在重吸收损耗。当激光介质长度较长 ( $l > 85$  mm) 时,在总损耗中重吸收损耗项占据的比重较

大,因此重吸收损耗项对泵浦功率密度阈值起决定作用。同时, $^3H_6$  能级中的  $610\text{ cm}^{-1}$  子能级的热粒子数远大于  $730\text{ cm}^{-1}$  子能级的热粒子数,因此  $610\text{ cm}^{-1} \rightarrow 5\ 556\text{ cm}^{-1}$  能级之间的重吸收远大于  $730\text{ cm}^{-1} \rightarrow 5\ 556\text{ cm}^{-1}$  能级之间的重吸收。此时下能级位于  $730\text{ cm}^{-1}$  子能级的激光发射具有更低的阈值,激光首先在  $5\ 556\text{ cm}^{-1} \rightarrow 730\text{ cm}^{-1}$  能级之间形成,Tm : YAG 激光器的输出波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ ;当激光介质长度较短 ( $l < 85\text{ mm}$ ) 时,重吸收损耗项占据总损耗的比重较小,发射截面对泵浦功率密度阈值起决定作用,在  $2.0 \sim 2.1\ \mu\text{m}$  的光谱区,随波长的红移,对应的发射截面逐渐减少,即  $^3F_4$  最低 Stark 能级  $5\ 556\text{ cm}^{-1}$  子能级向  $^3H_6$  能级中的  $610\text{ cm}^{-1}$  子能级跃迁具有较大的发射截面,所以此时下能级位于  $610\text{ cm}^{-1}$  子能级的激光发射具有更低的阈值,激光开始在  $5\ 556\text{ cm}^{-1} \rightarrow 610\text{ cm}^{-1}$  能级间形成,从而使 Tm : YAG 激光器的输出波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ 。

### 3 实验结果分析

激光介质长度为 69 mm 的单模块激光器和激光介质长度为 138 mm 的双模块激光器实验装置分别如图 4 和图 5 所示。 $M_1$  为全反镜,表面镀  $2\ \mu\text{m}$  波段的宽带高反膜,反射率  $R > 99.5\%$ ;  $M_2$  为输出耦合镜,朝向腔内的表面镀  $2\ \mu\text{m}$  部分透射膜,朝向腔外的表面镀  $2\ \mu\text{m}$  波段的宽带增透膜,镜片总反射率  $R = 95\%$ 。两腔镜与激光模块的距离  $L_1 = L_3 = 25\text{ mm}$ ,  $L_2 = 2 \times L_3$ ,以形成对称腔结构。

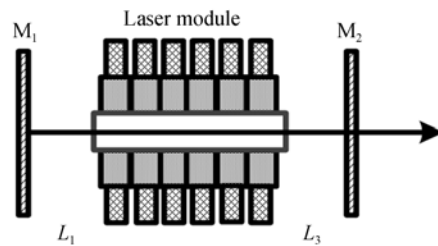


图 4 单个模块对称短腔实验示意图  
Fig. 4 Schematic of single-module Tm : YAG laser around  $2\ \mu\text{m}$

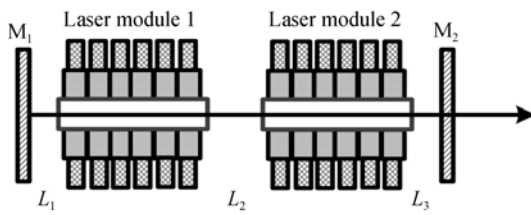


图 5 双模块串接 Tm:YAG 激光器示意图

Fig. 5 Schematic of two-module Tm:YAG laser around  $2\ \mu\text{m}$ 

利用一台光纤光谱仪(型号为 NIRQuest 256-2.5, Ocean Optics)分别对激光介质长度为 69 mm 的单模块激光器、激光介质长度为 138 mm 的双模块激光器的输出波长进行测试,如图 6 所示。在晶体温度为 281 K(对应晶体的冷却温度为  $8\ ^\circ\text{C}$ )的情况下,激光介质长度为 69 mm 的单模块激光器,在最高输出功率为 69.7 W 时,激光器的输出波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ ;激光介质长度为 138 mm 的双模块激光器,在最高输出功率为 115 W 时,输出波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ 。这是由于激光介质长度为 69 mm 时, $2.02\ \mu\text{m}$ 、 $2.07\ \mu\text{m}$  的重吸收

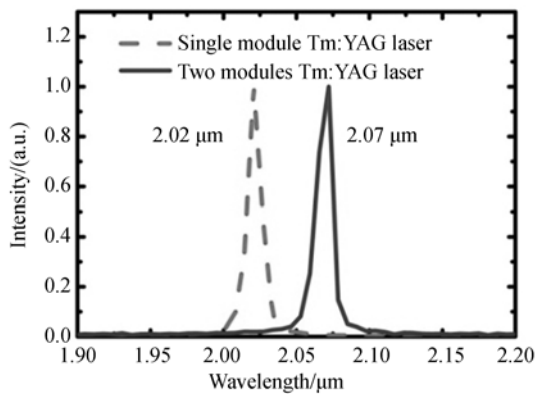


图 6 单模块和双模块激光光谱图

Fig. 6 Spectra of single-module and two-modules Tm:YAG laser

#### 参考文献:

- [1] YU J, TRIEU B C, MODIN E A, *et al.*. 1 J/pulse Q-switched  $2\ \mu\text{m}$  solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31: 462-464.
- [2] SUNI P J M, HENDERSON S W. 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16: 817-819.
- [3] YOKOZAWA T, HARA H. Laser-diode end-

损耗分别为 0.018 1, 0.009 8, 对应的泵浦阈值分别为 68.7, 73.1, 因此输出波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ ;而当激光介质长度为 138 mm 时, $2.02\ \mu\text{m}$ 、 $2.07\ \mu\text{m}$  的重吸收损耗分别为 0.0363, 0.0196, 对应的泵浦阈值分别为 122.5, 103.3, 输出波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ 。上述结果与理论计算结果一致。

## 4 结 论

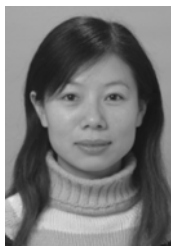
本文基于重吸收损耗的 LD 侧面泵浦激光器泵浦阈值的理论模型,对不同振荡模式下的泵浦阈值密度进行数值模拟。通过分析不同激光波长下的吸收泵浦阈值功率密度,通过改变激光介质长度及调节晶体温度可以实现  $2\ \mu\text{m}$  波段 Tm:YAG 激光器波长在  $2.02\ \mu\text{m}$  与  $2.07\ \mu\text{m}$  的调控。实验结果表明:如果输出耦合率固定为 5%,激光介质温度为 281 K,当激光介质长度小于 85 mm 时,此时具有较大发射截面的  $2.02\ \mu\text{m}$  谱线会优先起振,Tm:YAG 激光器的输出波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ ,当激光介质长度大于 85 mm 时,此时具有较小重吸收损耗的  $2.07\ \mu\text{m}$  谱线会优先起振,Tm:YAG 激光器的输出波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ 。如果输出耦合率固定为 5%,激光介质长度为 69 mm,激光输出波长从  $2.02\ \mu\text{m}$  跳变到  $2.07\ \mu\text{m}$  对应的晶体温度为 332 K;激光介质长度为 138 mm,激光输出波长从  $2.02\ \mu\text{m}$  跳变到  $2.07\ \mu\text{m}$  对应的晶体温度为 220 K。通过搭建激光器实验平台对数值模拟结果进行验证,结果表明,在晶体温度为 281 K 情况下,激光介质长度为 69 mm 的单模块 Tm:YAG 激光器的输出波长为  $2.02\ \mu\text{m}$ ;激光介质长度为 138 mm 的双模块串接 Tm:YAG 激光器的输出波长为  $2.07\ \mu\text{m}$ 。实验结果和理论模拟结果完全一致。

pumped Tm:YAG eye-safe laser [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35:1424-1426.

- [4] LAI K S, PHUA P B, WU R F, *et al.*. 120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25:1591-1593.
- [5] SCHELLHORN M, HIRTH A, KIELECK C. Ho:YAG laser intracavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28: 1933-1935.
- [6] SATO A, ASAI K, ITABE T. Double-pass-pumped Tm:YAG laser with a simple cavity config-

- uration [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37: 6395-6400.
- [7] STONEMAN R C, ESTEROWITZ L. Intracavity-pumped 2.09- $\mu\text{m}$  Ho : YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17:736-738.
- [8] SO S, MACKENZIE J I, SHEPHERD D P, *et al.*. Intra-cavity side-pumped Ho:YAG laser [J]. *Opt. Exp.*, 2006, 14:10481-10487.
- [9] SATO A, ASAI K, ITABE T. Double-pass-pumped Tm : YAG laser with a simple cavity configuration [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37:6395-6400.
- [10] BURYYO A, SUGAK D Y, UBIZSKII S B, *et al.*. The comparative analysis and optimization of the free-running Tm<sup>3+</sup> : YAP and Tm<sup>3+</sup> : YAG microlasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, 88:433-442.
- [11] JU Y L, WANG Q, WU C T, *et al.*. Lasing characteristics of a single-frequency Tm : YAG laser [J]. *Laser Phys.*, 2009, 19: 1216-1219.
- [12] HONEA E C, BEACH R J, SUTTON S B, *et al.*. 115-W Tm : YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *J. Quantum Electron.*, 1997,33:1592-1600.
- [13] LAI K S, XIE W J, WU R F, *et al.*. A 150 W 2-micron diode-pumped Tm : YAG laser [J]. *In Conference on Advanced Solid-state Lasers*,2002, 68, 535-539.
- [14] CAO D, PENG Q, DU S, *et al.*. A 200 W diode-side-pumped CW 2  $\mu\text{m}$  Tm : YAG laser with water cooling at 8  $^{\circ}\text{C}$  [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 103: 83-88.
- [15] STONEMAN R C, ESTEROWITZ L. Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm : YAG and Tm : YSGG cw lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1990, 15: 486-488.
- [16] WANG, DU S F, NIU Y X, *et al.*. Wavelength switchable high-power diode-side-pumped rod Tm : YAG laser around 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Exp.*, 2013, 21: 7156-7161.
- [17] WANG C L, NIU Y X, DU S F, *et al.*. High-power diode-side-pumped rod Tm : YAG laser at 2.07  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52: 7494-7497.
- [18] HENDERSON S W, SUNI P J M, HALE C P, *et al.*. Coherent laser radar at 2  $\mu\text{m}$  using solid-state lasers [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1993,31: 4-7.
- [19] YAO B Q, CHEN F, ZHANG C H, *et al.*. Room temperature single-frequency output from a diode-pumped Tm, Ho : YAP laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36: 1554-1556.
- [20] PETROV V, TANAKA Y, SUZUKI T. Parametric generation of 1-ps pulses between 5 and 11  $\mu\text{m}$  with a ZnGeP<sub>2</sub> Crystal [J]. *J. Quantum Electron.*, 2002, 33:1749-1755.
- [21] NIEUWENHUIS, LEE C J, van DER SLOT P J M, *et al.*. Mid-infrared ZGP optical parametric oscillator directly pumped by a lamp-pumped, Q-switched Cr,Tm,Ho:YAG laser [J]. *SPIE*,2007, 455: 645518-2.
- [22] ESSER M J D, PREUSSLER D, BERNHARDI E H, *et al.*. Diode-end-pumped Tm : GdVO<sub>4</sub> laser operating at 1818 and 1915 nm [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, 97:351-356.
- [23] NIU Y X, WANG C L, LIU W W, *et al.*. Theoretical model predictions and experimental results for a wavelength switchable Tm : YAG laser [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53: 4359-4362.
- [24] TAIRA T, TULLOCH W M, BYER R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb : YAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36: 1867-1874.
- [25] FAN T Y, BYER R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd : YAG laser [J]. *J. Quantum Electron.*, 1987, 23: 605-612.
- [26] 满达,牛燕雄,王彩丽. Tm : YAG 激光器的波长可调谐理论和实验研究[J]. *光学学报*,2015, 35(1) :218-224.
- MAN D, NIU Y X, WANG C L. Theoretical model and experimental study for wavelength tunable Tm:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*,2015, 35(1):218-224. (in Chinese)

## 作者简介:



王彩丽(1983—),女,河南周口人,博士,工程师,2015年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事固体激光技术的研究。E-mail: clw3662@163.com

## 通讯作者:



谢仕永(1984—),男,山东潍坊人,博士,工程师,2011年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事固体激光及变频技术的研究。E-mail: shiyong515@163.com