

# Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂锗酸盐玻璃 2 μm 波段连续激光输出

邹育婉<sup>1</sup> 王庆<sup>1</sup> 张永东<sup>1</sup> 李德华<sup>1</sup> 魏志义<sup>1</sup> 令维军<sup>2</sup> 范金太<sup>3</sup> 张龙<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

**摘要** 报道了一种 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂的新型 FGe 玻璃连续激光运转。实验中增益介质采用未镀膜的掺杂摩尔分数为 1% 的 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 GeO<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaF<sub>2</sub>-MO/F<sub>2</sub> (FGe) 玻璃, 在波长 790 nm 的钛宝石激光抽运下, 使用两种输出耦合镜分别实现了连续激光振荡。在 3% 输出耦合镜下得到了 83 mW 的激光输出, 斜率效率为 13.7%, 光-光转换效率为 8.8%, 激光的中心波长为 1968 nm。

**关键词** 激光器; 2 μm; 掺 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 FGe 玻璃; 连续激光

**中图分类号** TN248.1<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402004

## Continous Wave Operation of Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Doped Germanate Glass Laser around 2 μm

Zou Yuwan<sup>1</sup> Wang Qing<sup>1</sup> Zhang Yongdong<sup>1</sup> Li Dehua<sup>1</sup> Wei Zhiyi<sup>1</sup>  
Ling Weijun<sup>2</sup> Fan Jintai<sup>3</sup> Zhang Long<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A continuous-wave (CW) Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped FGe glass laser is demonstrated. An uncoated one percent of mole fraction Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped GeO<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaF<sub>2</sub>-MO/F<sub>2</sub> (FGe) glass is employed as the laser medium. Pumped with a Ti:sapphire laser at 790 nm, CW laser is realized using two kinds of output couplers (OC). Under the 3% OC, output power of 83 mW is obtained, corresponding to a slope efficiency of 13.7%, and the optical conversion efficiency is 8.8%. The measured central wavelength is 1968 nm.

**Key words** lasers; 2 μm; Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped FGe glass; continuous-wave laser

**OCIS codes** 140.3070; 140.3580; 160.2750; 160.5690

## 1 引 言

人眼安全的 2 μm 波段激光器由于在雷达、传感、光参量振荡器以及医疗等领域的诸多应用, 是人们非常感兴趣的重要激光源<sup>[1,2]</sup>, 处于 1.8 μm 和 2 μm 发射带的 Tm<sup>3+</sup> 和 Ho<sup>3+</sup> 掺杂激光是目前国内外激光研究的热点之一。其中以 Tm<sup>3+</sup> 为发光中心的固体激光, 调谐范围可达到 1.87~2.16 μm<sup>[3]</sup>。

同时, Tm<sup>3+</sup> 能级间存在着交叉弛豫过程 (<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>3</sup>F<sub>4</sub>, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>), 使得吸收一个抽运光子可在激光上能级<sup>3</sup>F<sub>4</sub> 态上产生两个激发态光子<sup>[4]</sup>, 量子效率可接近 200%。其次, 由于 Tm<sup>3+</sup> 在 800 nm 波段的强吸收, 可以很方便地用 AlGaAs 激光二极管直接抽运。因此, 掺 Tm<sup>3+</sup> 的介质材料成为产生近红外波段激光的优质增益材料。

**收稿日期**: 2010-10-26; **收到修改稿日期**: 2010-11-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(60878015, 10874237 和 60878020)资助课题。

**作者简介**: 邹育婉(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事新型全固态激光方面的研究。E-mail: ywzou@iphy.ac.cn

**导师简介**: 魏志义(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事超强超短脉冲激光及新型全固态激光等方面的研究。

E-mail: zywei@iphy.ac.cn(通信联系人)

稀土离子掺杂的玻璃材料由于其良好的性能而被广泛应用于传统激光器和光纤激光器中,并且已经成为研究光纤激光器和光纤放大器等光纤光子器件的技术关键<sup>[5]</sup>。与其他玻璃材料相比,锆酸盐玻璃有较高的折射率,宽广的红外透过范围(0.4~5.0 μm),良好的热稳定性,对稀土离子高的溶解性等特点,从而成为激光基质的可选材料<sup>[6~9]</sup>。锆酸盐玻璃较低的声子能量(约 900 cm<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>),有望有效抑制 Tm<sup>3+</sup> 的无辐射过程,从而大幅度提高 Tm<sup>3+</sup> 在玻璃中的发光效率。同时,锆酸盐玻璃良好的玻璃成形能力和较好的物化性能,非常适宜于制备光纤预制棒并能够拉制出高质量的光纤<sup>[11]</sup>。近年来各种 Tm<sup>3+</sup> 掺杂锆酸盐玻璃在 2 μm 波段的光谱性能研究<sup>[12,13]</sup>以及高效率的掺 Tm<sup>3+</sup> 锆酸盐玻璃光纤激光器的研究<sup>[14,15]</sup>均有很多相关报道,但掺 Tm<sup>3+</sup> 锆酸盐玻璃固体激光器的研究工作较少。2009~2010年,F. Fusari 等<sup>[16,17]</sup>在掺 Tm<sup>3+</sup> 的 GPNG 玻璃上实现了 2 μm 激光的连续输出,采用钛宝石激光抽运得到的最高输出功率为 190 mW,斜率效率为 50% (相对于吸收抽运光功率),中心波长位于 1952 nm。

对不同组分的掺杂锆酸盐玻璃的激光特性研究和物化性能分析是寻找更好的锆酸盐玻璃材料的有效途径。本文采用 790 nm 波段钛宝石激光作为抽运源,在 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂的新型 FGe 玻璃上实现了 83 mW 连续激光运转,中心波长位于 1968 nm。如果对此玻璃采用增透膜处理可以获得更高功率的激光输出,将来有望发展成为新型锆酸盐玻璃光纤激光器。

## 2 实验装置

实验中采用的增益介质为中国科学院上海光学精密机械研究所提供的掺杂摩尔分数为 1% 的 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 GeO<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaF<sub>2</sub>-MO/F<sub>2</sub> (FGe) 玻璃,尺寸为 4.5 mm×4.5 mm×7.6 mm。Tm<sup>3+</sup> 的粒子数密度为 4.20×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>。图 1 给出了掺杂摩尔分数为 1% 的 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 FGe 玻璃的吸收截面和发射截面曲线,在吸收峰 790 nm 处的吸收截面为 5.89×10<sup>-21</sup> cm<sup>2</sup>,在发射峰 1898 nm 处的发射截面为 4.07×10<sup>-21</sup> cm<sup>2</sup>。采用 FLSP920 荧光光谱仪测试了玻璃的荧光寿命,测试结果为 6.3 ms。玻璃的两端面均未镀膜。

实验中采用的抽运源为商用钛宝石激光器 (Tsunami, Spectra-Physics),工作在锁模输出模式,脉宽为 60 ps,重复频率为 80 MHz,采用脉冲激光抽

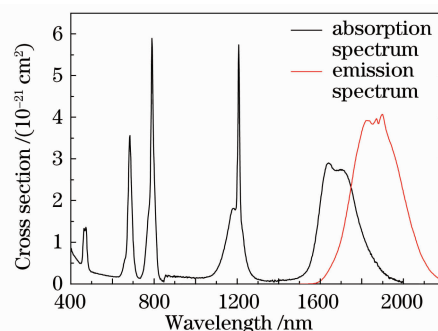


图 1 掺杂 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 FGe 玻璃的吸收截面和发射截面曲线

Fig. 1 Absorption cross section and emission cross section of the Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped FGe glass

运是为了降低增益介质上的热存储从而提高其抗热能力,因为 FGe 玻璃的热导率只有 0.67 W/(m·K)。实验装置采用如图 2 所示的四镜折叠腔结构。其中 M1, M2 为曲率半径 100 mm 的宽带双色凹面镜,其对 790 nm 波段抽运激光透射率大于 95%,对 1900~2100 nm 波段的反射率大于 99.9%。抽运光通过一块焦距为 100 mm 的凸透镜 L 聚焦到增益介质中。为了避免损伤增益介质,激光介质用铝箔包裹后夹持在紫铜冷却片内,实验过程中采用循环水系统对紫铜晶体夹进行冷却,水温维持在 12 °C 左右。采用透射率分别为 1.5% 和 3.0% 的两种输出镜 (OC),腔的另一个端镜为对 1900~2100 nm 波段反射率可达 99.8% 的高反镜 (HR),整个腔长为 948 mm。

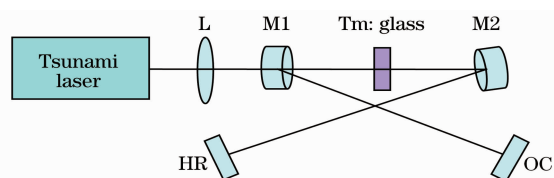


图 2 掺杂 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 FGe 玻璃激光实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped FGe glass laser

## 3 实验结果

实验测得 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:FGe 玻璃对抽运光的吸收率为 78%。通过仔细调节腔镜 M1, M2 的位置以及端镜的角度,在最大功率 1 W 的锁模脉冲抽运光条件下,使用两种输出耦合镜分别得到了连续激光输出。图 3 给出了输出功率随入射抽运功率的变化曲线。当使用 3.0% 输出镜时得到的最高激光输出为 83 mW,对应曲线的斜率效率为 13.7%,光-光转换效率为 8.8%,实验测得阈值为 360 mW;使用 1.5% 输出镜时的激光输出功率为 70 mW,对应曲线的斜

率效率为 11.4%, 光-光转换效率为 7.4%, 阈值为 309 mW。从图中可以看出, 输出功率成线性增长, 未见饱和现象。由于实验中增益介质的两端面均未镀膜, 腔内损耗比较大, 因此效率比较低, 如果采用经过镀膜后的激光材料, 可以预见系统效率将大大提高。

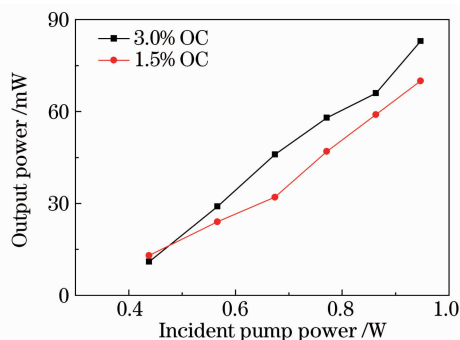


图 3 激光输出功率随入射功率的变化曲线

Fig. 3 Output power versus incident pump power

采用脉冲激光抽运得到了连续激光输出, 这是因为  $\text{Tm}_2\text{O}_3:\text{FGe}$  玻璃的荧光寿命为 6.3 ms, 而抽运脉冲重复频率为 80 MHz, 这样相对于上能级弛豫时间很长的  $\text{Tm}_2\text{O}_3:\text{FGe}$  玻璃而言, 此抽运光为准连续抽运光; 其次, 实验中采用的腔长并没有严格匹配于达到同步抽运时所需要的腔长, 所以得到的是连续激光输出。

实验中采用北京卓立汉光公司生产的 Omni- $\lambda$ 150 光栅单色仪 (150 mm 焦距, 光栅刻线: 每毫米 300 刻线, 闪耀波长为 1250 nm, 分辨率为 1.6 nm) 测量激光的输出光谱, 所使用的探测器为 HgCdTeZn 红外探测器 (PCI-3TE-10.6), 探测器后的信号通过锁相放大器 (SR 830) 被放大。测量得到的中心波长为 1968 nm, 光谱半峰全宽为 12.6 nm, 相应的光谱见图 4。激光输出波长偏离了发射峰, 这是由于  $\text{Tm}^{3+}$  激光属于准三能级系统, 存

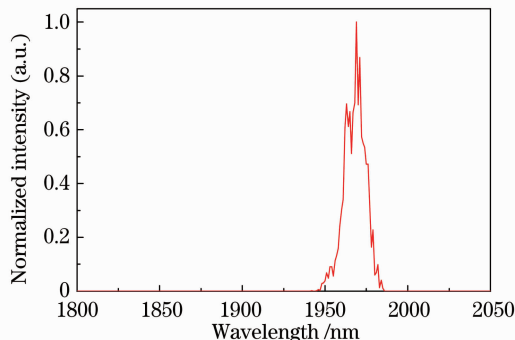


图 4 掺杂  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  的 FGe 玻璃激光输出的光谱图

Fig. 4 Laser spectrum of the  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  doped FGe glass

在再吸收损耗, 激光运转将倾向于发射截面稍小但其再吸收损耗很小的长波。

## 4 结 论

利用脉冲钛宝石激光作为抽运源, 在  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  掺杂的 FGe 玻璃上实现了连续激光运转。采用四镜折叠腔结构, 在抽运功率为 1 W 时, 采用耦合率为 3.0% 的输出镜, 得到的输出功率为 83 mW, 相应的斜率效率为 13.7%, 光-光转换效率为 8.8%; 在输出耦合率为 1.5% 的情况下, 得到的输出功率为 70 mW, 相应的斜率效率为 11.4%, 光-光转换效率为 7.4%, 测量得到的光谱中心波长为 1968 nm。如果采用经过镀膜后的激光材料, 降低腔内损耗, 预期还可以得到进一步提高的输出功率。随着玻璃制备工艺的完善,  $\text{Tm}_2\text{O}_3$  掺杂的 FGe 玻璃在  $2\ \mu\text{m}$  波段将会是一种很有潜质的增益材料, 同时其在锗酸盐玻璃光纤激光器中也会有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 S. W. Henderson, P. J. M. Suni, C. P. Hale *et al.*. Coherent laser-radar at  $2\ \mu\text{m}$  using solid-state lasers[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, **31**(1): 4~15
- 2 G. J. Koch, M. Petros, J. Yu *et al.*. Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho:Tm:YLF laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9): 1718~1721
- 3 R. C. Stoneman, L. Esterowitz. Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm-YAG and Tm-YSGG CW lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 486~488
- 4 S. D. Jackson. Cross relaxation and energy transfer upconversion process relevant to the function of  $2\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$ -doped silica fiber lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(1-3): 197~203
- 5 Wang Yaoliang. Development and applications of optical glasses[J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(5): 61~66  
王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. *应用光学*, 2005, **26**(5): 61~66
- 6 J. Wang, J. R. Lincoln, W. S. Brocklesby *et al.*. Fabrication and optical properties of lead-germanate glasses and a new class of optical fibers doped with  $\text{Tm}^{3+}$  [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(12): 8066~8075
- 7 Bin Tang, Chunfeng Wu, Jiacheng Li *et al.*. Large-size oxyfluoride glasses used for vis-IR-transmitting windows[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2009, **355**(37-42): 2006~2009
- 8 Xin Jiang, Joris Lousteau, Billy Richards *et al.*. Investigation on germanium oxide-based glasses for infrared optical fibre development[J]. *Opt. Mater.*, 2009, **31**(11): 1701~1706
- 9 Tang Bin, Wang Zheng, Yang Yi *et al.*. Synthesis and luminescence properties of  $\text{Er}^{3+}$ -doped transparent oxy-fluoride germanate glass ceramics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2344~2349  
唐彬, 王政, 羊毅等. 掺铒透明氧氟锗酸盐微晶玻璃的制备及发光性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2344~2349
- 10 D. D. Martino, L. F. Santos, A. C. Marques *et al.*. Vibrational spectra and structure of alkali germanate glasses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2001, **293-295**: 394~401
- 11 Yu Chunlei, He Dongbing, Wang Guonian *et al.*. The effects of

- Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> doping concentration on 2 μm wavelength luminescence in germanium glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3143~3147  
 于春雷, 何冬兵, 汪国年等. 锗酸盐玻璃中 Yb<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 掺杂浓度对 2 μm 发光的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3143~3147
- 12 Brian M. Walsh, Norman P. Barnes, Donald J. Reichle *et al.*. Optical properties of Tm<sup>3+</sup> ions in alkali germanate glass[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(50-51): 5344~5352
- 13 Xia Haiping, Lin Qiongfai, Zhang Jianli *et al.*. 2 μm mid-infrared optical spectra of Tm<sup>3+</sup>-doped germanium gallate glasses[J]. *Journal of Rare Earths*, 2009, **27**(5): 781~785
- 14 Jianfeng Wu, Zhidong Yao, Jie Zong *et al.*. Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 638~640
- 15 N. P. Barnes, B. M. Walsh, D. J. Reichle *et al.*. Tm: germanate fiber laser: tuning and Q-switching[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **89**(2-3): 299~304
- 16 F. Fusari, A. A. Lagatsky, Gin Jose *et al.*. Laser operation of a bulk Tm<sup>3+</sup>: germanate glass laser around 2 μm with 50 % internal slope efficiency[C]. LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. 745~746
- 17 F. Fusari, A. A. Lagatsky, G. Jose *et al.*. Femtosecond mode-locked Tm<sup>3+</sup> and Tm<sup>3+</sup>-Ho<sup>3+</sup> doped 2 μm glass lasers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22090~22098

\*\*\*\*\*

## 百瓦级全国产全光纤主振荡功率放大激光器系列

基于主振荡功率放大(MOPA)结构的全光纤激光器无需空间光路调节,具有结构紧凑、工作稳定等优势,是高功率光纤激光器的重要发展方向。高功率光纤激光的国产化对于突破国外长期以来形成的价格垄断和技术封锁,实现具有自主知识产权的光纤激光器具有重要意义。

本课题组采用 MOPA 结构成功实现多种不同波段的百瓦级全国产全光纤激光器系列。激光器由级联放大结构组成,其中种子光为自行搭建的输出功率在百毫瓦量级的单模光纤激光器。种子激光经隔离器后注入级联放大器。级联放大器第一级将种子光功率放大到 3 W 左右。第二级放大器为功率主放,放大器的抽运源为 4 个工作在 976 nm 附近,尾纤输出的 50 W 级国产激光二极管(LD,北京凯普林光电科技有限公司生产)。经测定同时开启 4 个抽运源时总抽运功率可达 175.2 W。经预放大的种子光和 4 个 LD 输出的抽运光经一个国产(6+1)×1的抽运合束器(深圳朗光科技有限公司提供)注入双包层掺杂光纤,第一、二级放大器所使用的增益光纤为中国电子科技集团第 23 研究所提供的国产大模场双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤,纤芯和内包层直径分别为 11 μm 和 130 μm,在 976 nm 附近的吸收系数约为 5.5 dB/m。整个激光器系统除 LD 采用水冷外(水温保持在 25 ℃),其他部件均依靠空气对流散热。光纤激光器的输出光功率与主放注入的抽运光

功率的关系如图 1 所示。当最大抽运功率为 175.2 W 时,得到了 126 W 的激光输出,光-光转换效率为 72%。实验室中激光器单次可以稳定运行数小时,累计拷机时间已超过 20 h。目前仅使用了抽运合束器 6 个抽运端口中的 4 个,进一步增加抽运功率有望获得更大的输出功率。

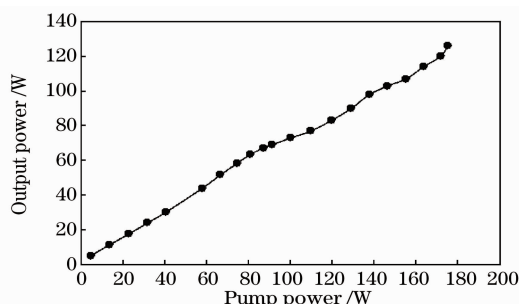


图 1 激光功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 1 Output power versus the pump power

本文报道的全光纤激光器还具有结构模块化的特性。利用掺镱光纤具有较宽的发射谱这一特性,只需更换百毫瓦级的种子激光器,即可实现不同波长的百瓦级高功率全光纤激光输出。目前课题组已经实现了 1040, 1053, 1064, 1080 和 1091 nm 等波段的高功率输出。

董小林 肖虎 周朴 王小林 马阎星  
冷进勇 郭少锋 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙,410073)