

文章编号: 0253-2239(2009)11-3143-05

# 锗酸盐玻璃中 $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 掺杂浓度对 $2\ \mu\text{m}$ 发光的影响

于春雷 何冬兵 汪国年 胡丽丽 张军杰\*

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院强激光重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 为了研究锗酸盐玻璃中采用  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  三掺杂方式实现  $2\ \mu\text{m}$  激光的可行性, 研究了 3 种稀土离子的掺杂浓度对近  $2\ \mu\text{m}$  发光的影响, 从而对稀土离子掺杂浓度进行优化选择以确定理想的掺杂浓度。实验结果表明, 在  $\text{TmF}_3$  掺杂摩尔分数为 1% 时, 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度增强; 当  $\text{TmF}_3$  掺杂摩尔分数为 3% 时, 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度降低; 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高,  $\text{Tm}^{3+}$  的近  $2\ \mu\text{m}$  荧光发射会得到增强, 且当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较高时其发光更为明显, 这相对削弱了  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光。  $\text{Ho}^{3+}$   $2\ \mu\text{m}$  发光受  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  的浓度比值影响很大, 即用 980 nm 光抽运三掺杂样品, 无论  $\text{Tm}^{3+}$  浓度单一提高还是  $\text{Ho}^{3+}$  浓度单一降低, 对于  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光都是不利的。

**关键词** 光学材料; 锗酸盐玻璃; 光谱性质;  $2\ \mu\text{m}$  激光; 稀土掺杂

**中图分类号** TQ171.73+5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3143

## The Effects of $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ Doping Concentration on $2\ \mu\text{m}$ Wavelength Luminescence in Germanium Glasses

Yu Chunlei He Dongbing Wang Guonian Hu Lili Zhang Junjie\*

(Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to study on the feasibility of achieving  $2\ \mu\text{m}$  laser by using  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  codoping in germanium glass, the effects of doping concentration of three rare-earth ion on the nearly  $2\ \mu\text{m}$  luminescence were researched, so optimized doping concentration can be acquired. The results show that when the doping mole fraction of  $\text{TmF}_3$  is 1%, the  $2\ \mu\text{m}$  luminescence of  $\text{Ho}^{3+}$  increases with doping concentration of  $\text{Yb}^{3+}$  ions. However, as the doping mole fraction of  $\text{TmF}_3$  is increased to 3%, the  $2\ \mu\text{m}$  luminescence intensity of  $\text{Ho}^{3+}$  is reduced with increasing doping concentration of  $\text{Yb}^{3+}$ . The near  $2\ \mu\text{m}$  luminescence of  $\text{Tm}^{3+}$  can be raised by increasing doping concentration of  $\text{Yb}^{3+}$  ions and it is more apparent at high doping concentration of  $\text{Tm}^{3+}$  ions, which could weaken the luminescence of  $\text{Ho}^{3+}$  relatively. On the whole, the  $2\ \mu\text{m}$  luminescence of  $\text{Ho}^{3+}$  is significantly effected by the doping concentration ratio of  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ . When the three doped samples were pumped by 980 nm LD, both the high doping concentration of  $\text{Tm}^{3+}$  ions and low doping concentration of  $\text{Ho}^{3+}$  ions can lead to the reduction of  $2\ \mu\text{m}$  luminescence intensity of  $\text{Ho}^{3+}$ .

**Key words** optical materials; germanium glass; spectroscopic properties;  $2\ \mu\text{m}$  laser; rare-earth doped

## 1 引 言

近年来,人们对稀土掺杂光纤激光和放大器的研究显示出浓厚的兴趣,在近红外波段已经取得很大研究进展并获得了广泛应用。对于波长为  $2\ \mu\text{m}$  的中红

外激光,在医疗外科手术、光通讯、气体监测、环境污染检测分析及人眼安全激光雷达等领域以及用于新的中红外波段激光抽运源都具有十分重要的应用价值<sup>[1~5]</sup>。  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  已作为  $2\ \mu\text{m}$  区域各种不同基

收稿日期: 2008-11-30; 收到修改稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z441)资助课题。

作者简介: 于春雷(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事稀土掺杂玻璃发光方面的研究。E-mail: sdyclley@163.com

\* 通信联系人。E-mail: jjzhang@mail.siom.ac.cn.

质中激光的激活离子而得到了大量的研究<sup>[6~9]</sup>。掺杂  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  离子的光纤激光器是作为紧凑高效的全固态激光源的强有力的候选者<sup>[10~13]</sup>。

随着大功率半导体激光器和包层抽运方式的采用,掺铽光纤激光器的性能也得到了很大的改进。德国 IPG. Photonic 公司采用光纤熔锥抽运技术和光纤光栅谐振腔技术实现的掺铽双包层石英光纤激光器已达到 150 W 的连续波输出<sup>[14]</sup>。NP Photonics 公司于 2007 年在铽掺杂锗酸盐玻璃双包层单模光纤中获得 1.9  $\mu\text{m}$  激光输出,实验采用 800 nm LD 一端抽运方法获得激光功率为 64 W,斜率效率为 68%<sup>[15]</sup>。

另外一种引人关注的稀土离子是  $\text{Ho}^{3+}$ ,在医疗激光器和激光雷达领域有非常独特的优势<sup>[3,16]</sup>。对  $\text{Ho}^{3+}$  而言由于亚稳态寿命很长,适于制作脉冲激光器。 $\text{Ho}^{3+}$  掺杂光纤激光器存在的主要问题则是缺少有效的抽运源。为了更好的提高  $\text{Ho}^{3+}$  2  $\mu\text{m}$  的激光性能,一般采用共掺杂敏化离子的方式提高其发光性能。最为常见的一种敏化方式是通过  $\text{Tm}^{3+}$  敏化  $\text{Ho}^{3+}$  实现的,即通过  $\text{Tm}^{3+}:^3\text{H}_4$  能级能量转移至  $\text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_7$  能级,最终由  $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_3$  跃迁实现 2  $\mu\text{m}$  发光。为了进一步拓展利用商品化的激光抽运源,研究人员也尝试采用  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  三掺杂方式来实现 2  $\mu\text{m}$  发光,对于几种离子之间的能量转移关系都进行了相应的分析,并取得了许多有益结果<sup>[17]</sup>。

在石英基质中  $\text{Ho}^{3+}$  的无辐射跃迁会制约激光效率,因此研究具有低声子能量的玻璃基质的发光性质具有重要意义。锗酸盐玻璃具有相对较低的声子能量,且成玻璃性能好,适宜于制备光纤预制棒并控制光纤。已有研究机构成功的制备出  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂锗酸盐玻璃光纤并获得近 2  $\mu\text{m}$  激光输出<sup>[15]</sup>,因此在锗酸盐玻璃光纤实现  $\text{Ho}^{3+}$  的 2  $\mu\text{m}$  激光输出也具有很大的优势。

本文主要研究锗酸盐玻璃中采用  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  三掺杂方式实现 2  $\mu\text{m}$  发光的可行性,研究三种离子的掺杂浓度对 2  $\mu\text{m}$  发光强度的影响,从而对浓度进行优化选择,为制备锗酸盐玻璃光纤提供一定的参考。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

实验采用的玻璃组分如表 1 所示,其中  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{YbF}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{TmF}_3$ ,  $\text{HoF}_3$  的摩尔分数为 99.99%。按配方精确称取混合料约 30 g,充分混合,搅拌均匀,放入白金坩锅中于 1400  $^{\circ}\text{C}$  左右的硅钼棒电炉中熔化 60 min,浇注在钢模上,移入预热到玻璃转变温度  $T_g$  左右的马弗炉中退火 3 h,最后以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的降温速度降至室温。将玻璃加工成尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 1.5 mm 的玻璃片,玻璃片两大面抛光以供测试用。

表 1 玻璃编号及摩尔比组分

Table 1 Glass samples and compositions by mole ratio

Glass samples	Glass composition by mole ratio
G1	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{La}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:4:3:6:1:1$
G2	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{La}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:6:3:4:1:1$
G3	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{La}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:8:3:2:1:1$
G4	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{La}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:5:3:4:2:1$
G5	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{La}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:4:3:4:3:1$
G6	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:5:6:3:1$
G7	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:4.5:6:3:1.5$
G8	$n(\text{BaF}_2):n(\text{GeO}_2):n(\text{Ga}_2\text{O}_3):n(\text{YbF}_3):n(\text{TmF}_3):n(\text{HoF}_3)=20:65:4:6:3:2$

### 2.2 光谱测试

本实验的样品测试荧光时,采用 980 nm LD 抽运,光功率为 800 mW。测试时为了避免抽运光的倍频光干扰都采用了滤波片。激发光和发射光成 90 $^{\circ}$ ,激发光和样品平面成 60 $^{\circ}$ ,以上所有测试均在室

温下进行。

## 3 实验结果及讨论

采用 980 nm 抽运  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  三掺杂样品时,由于激光倍频干扰峰以及  $\text{Tm}^{3+}$  的发光峰

和  $\text{Ho}^{3+}$  的发光峰在一些波段出现重叠,这必然会引起峰位的偏移。图 1 中是对荧光谱按照 5 个峰进行高斯分峰处理后的结果,可以看出有 3 个主要的荧光发射峰,分别是  $1790\ \text{nm}$  的  $\text{Tm}^{3+}:^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁,  $1950\ \text{nm}$  和  $2044\ \text{nm}$  处则属于  $\text{Ho}^{3+}:^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$  跃迁,两个峰值分别对应于不同 Stark 子能级的跃迁,这与文献报道的发光峰特征基本一致。

图 2 给出了钨酸盐玻璃中固定  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度改变  $\text{Yb}^{3+}$  浓度时的荧光光谱。从图 2(a) 中可以看出,固定  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度比为  $1:1$  时,  $\text{YbF}_3$  含量逐渐降低时荧光强度也降低,且摩尔分数  $4\%$  的  $\text{YbF}_3$  和  $2\%$  的  $\text{YbF}_3$  样品荧光强度相差不大。然而从图 2(b) 中看出,当固定  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度比为  $3:1$  时,  $\text{YbF}_3$  摩尔分数从  $4\%$  变为  $6\%$  时,荧光强

度反而出现降低。这是 2 种相反的变化规律,为了更好的解释这一现象,将两图进行归一化处理如图 3 所示。

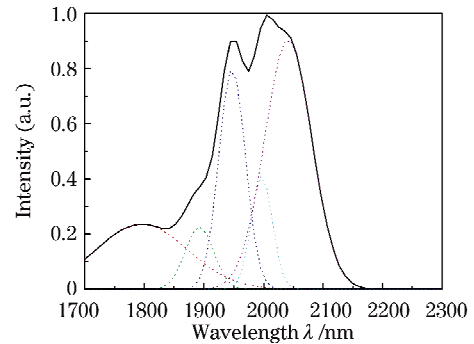


图 1  $2\ \mu\text{m}$  荧光光谱的高斯分峰拟合  
Fig. 1 Gaussian peaks simulation of the  $2\ \mu\text{m}$  fluorescence spectra

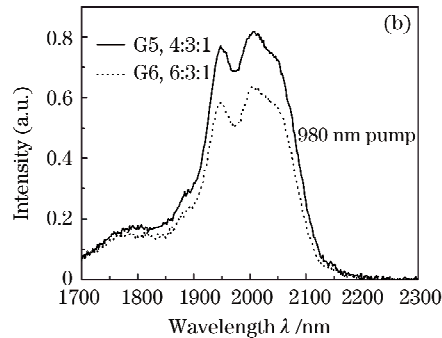
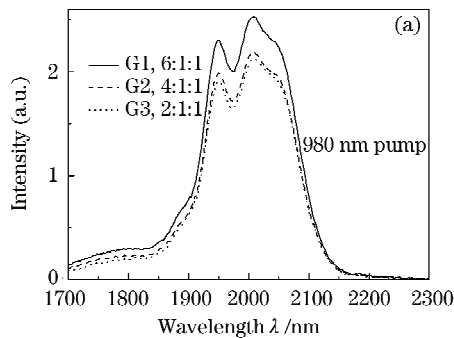


图 2  $\text{Yb}^{3+}$  浓度对发光的影响:(a)固定  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度比为  $1:1$ ;(b)固定  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度比为  $3:1$   
Fig. 2 Effect of  $\text{Yb}^{3+}$  concentration on the luminescence: (a) with  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Ho}^{3+}$  concentration rate of  $1:1$ ;  
(b) with  $\text{Tm}^{3+}$  and  $\text{Ho}^{3+}$  concentration rate of  $3:1$

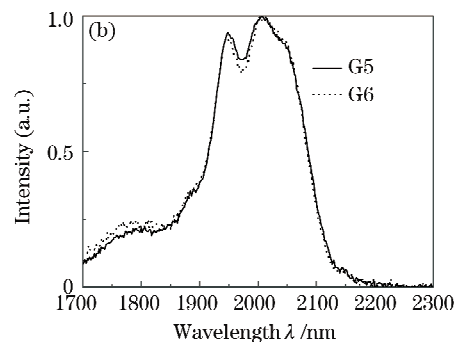
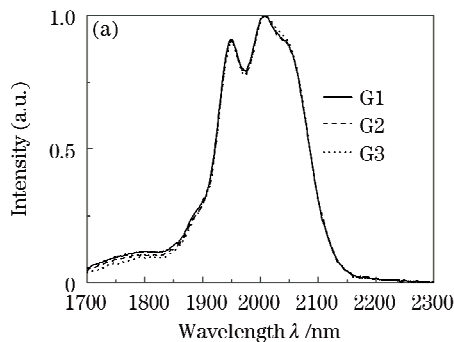


图 3 对图 2 的归一化光谱图。(a)图 2(a)的归一化结果;(b)图 2(b)的归一化结果  
Fig. 3 Normalized spectra in accordance with Fig. 2. (a) normalized spectra of Fig. 2(a);  
(b) normalized spectra of Fig. 2(b)

根据图 3(a)和(b),  $\text{YbF}_3$  浓度高的样品对应  $\text{Tm}^{3+}$  在  $1800\ \text{nm}$  处的发光较强,尤其 G6 样品  $\text{TmF}_3$  摩尔分数为  $3\%$  时,  $\text{Tm}^{3+}:^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁发光更为明显。由此可以得出以下结论:1)在  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较低时( $\text{TmF}_3$  摩尔分数为  $1\%$ ),随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度增强;2)当  $\text{Tm}^{3+}$

浓度较高时( $\text{TmF}_3$  摩尔分数为  $3\%$ ),随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度出现降低;3)随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高,  $\text{Tm}^{3+}$  的发光都会得到增强,且当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较高时其发光更为明显,相对削弱了  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光。

对于上述现象可以认为是由于 3 种离子之间的

能量转移过程在  $\text{Tm}^{3+}$  浓度提高后产生了变化引起的。如图 4 所示,根据  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  双敏化时的能量转移过程,当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度提高时,作为能量传递中间过程的  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow \text{Ho}^{3+} : ^5\text{I}_7$  (路径 3) 将会因为  $\text{Ho}^{3+}$  浓度相对  $\text{Tm}^{3+}$  离子浓度降低而减弱,也就是对  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4$  能级来说,相对缺少受体离子而无法更有效的转移能量,反而促进  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁发射。

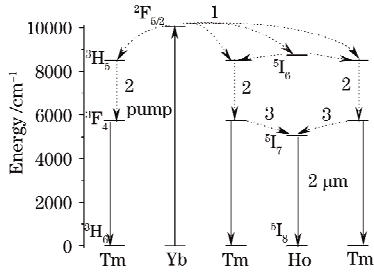


图 4  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  能量转移过程

Fig. 4 Energy transfer process of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$

对于  $\text{Tm}^{3+}$  浓度提高引起能量转移过程的影响,可以进一步从图 5 中看出,当固定  $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  浓度比为 4:1,  $\text{TmF}_3$  摩尔分数由 1% 提高到 2%,

3% 时,对应  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2 \mu\text{m}$  荧光强度明显减弱。对比其归一化荧光谱也可以看出,随着  $\text{TmF}_3$  浓度的提高  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁发射明显增强。可见  $\text{Tm}^{3+}$  的近  $2 \mu\text{m}$  荧光发射与  $\text{Ho}^{3+}$  的荧光发射存在很强的竞争,进一步验证了上面的结论。

从图 6 中看出,当固定  $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Tm}^{3+}$  浓度比为 6:3, 改变  $\text{HoF}_3$  的掺杂浓度时,对应  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2 \mu\text{m}$  荧光强度几乎没有变化。进一步从其归一化后结果图 6(b) 来看,  $\text{HoF}_3$  的掺杂浓度越低则  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁荧光越强,这也是由于  $\text{Ho}^{3+}$  浓度相对  $\text{Tm}^{3+}$  浓度低,引起能量传递过程  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow \text{Ho}^{3+} : ^5\text{I}_7$  相对减弱,进而相对促进了  $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$  跃迁发射。由此结合  $\text{TmF}_3$  浓度对  $2 \mu\text{m}$  荧光发射的影响,可以得出如下结论: 1)  $\text{Ho}^{3+}$  的浓度变化对  $2 \mu\text{m}$  荧光强度的影响要小于  $\text{Tm}^{3+}$  的作用; 2)  $2 \mu\text{m}$  发光受  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  的浓度比影响很大,即三掺杂玻璃在 980 nm LD 抽运下,无论  $\text{Tm}^{3+}$  浓度单一提高还是  $\text{Ho}^{3+}$  浓度单一降低,对于  $2 \mu\text{m}$  荧光都是不利的; 3) 在保证  $\text{Tm}^{3+}$  和  $\text{Ho}^{3+}$  的浓度相差不大的情况下,提高  $\text{Yb}^{3+}$  的浓度将会提高近  $2 \mu\text{m}$  发光强度。

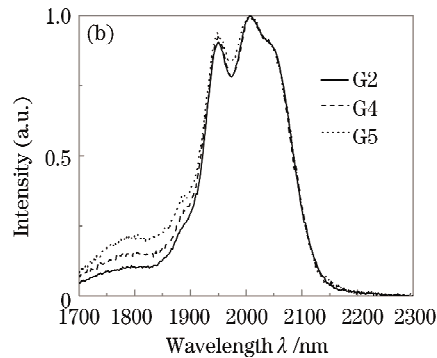
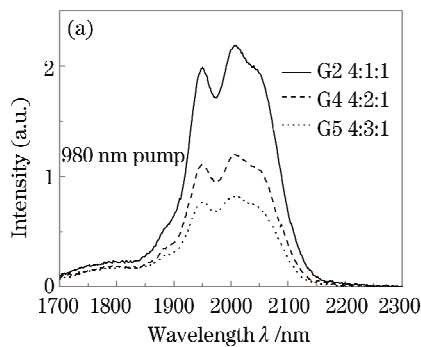


图 5  $\text{Tm}^{3+}$  浓度对发光的影响: (a) 荧光光谱; (b) 归一化荧光光谱

Fig. 5 Effect of  $\text{Tm}^{3+}$  concentration on the luminescence: (a) the fluorescence spectra; (b) normalized fluorescence spectra

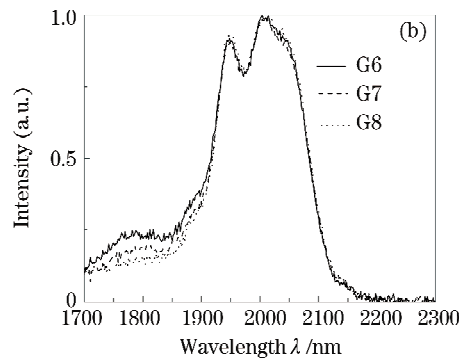
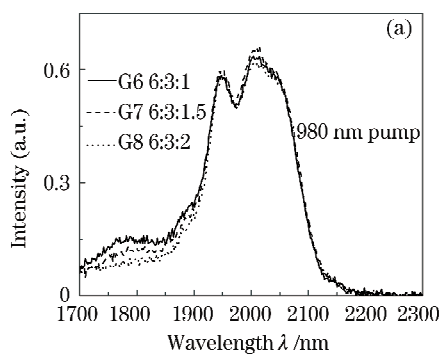


图 6  $\text{Ho}^{3+}$  浓度对发光的影响: (a) 荧光光谱; (b) 归一化荧光光谱

Fig. 6 Effect of  $\text{Ho}^{3+}$  concentration on the luminescence: (a) the fluorescence spectra; (b) normalized fluorescence spectra

## 4 结 论

通过改变钨酸盐玻璃中  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  三种稀土离子的掺杂浓度, 分别研究了三种稀土离子的浓度变化对近  $2\ \mu\text{m}$  发光的影响。研究结果表明在钨酸盐玻璃中掺杂  $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  时近  $2\ \mu\text{m}$  发光有如下特点: 在  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较低时 ( $\text{TmF}_3$  摩尔分数为 1%), 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度增强; 当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较高时 ( $\text{TmF}_3$  摩尔分数为 3%), 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光强度降低; 随着  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的提高,  $\text{Tm}^{3+}$  的近  $2\ \mu\text{m}$  荧光发射会得到增强, 且当  $\text{Tm}^{3+}$  浓度较高时其发光更为明显, 这相对削弱了  $\text{Ho}^{3+}$  的  $2\ \mu\text{m}$  荧光;  $\text{Ho}^{3+}$   $2\ \mu\text{m}$  发光受  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  的浓度比影响很大, 即用 980 nm 光抽运三掺杂样品, 无论  $\text{Tm}^{3+}$  浓度单一提高还是  $\text{Ho}^{3+}$  浓度单一降低, 对于  $2\ \mu\text{m}$  荧光都是不利的。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Kun, Ren Qiushi, Wei Shigang *et al.*. Application of  $2\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$  laser on biomedicine [J]. *Laser & Opto-Electronics Progress*, 2005, **42**(9): 52~56  
杨 昆, 任秋实, 魏石刚等.  $2\ \mu\text{m}$  钨( $\text{Tm}^{3+}$ )激光器在生物医学中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 52~56
- 2 Feng Yutong, Meng Junqing, Chen Weibiao. Research development of eye-safe all-solid-state lasers [J]. *Laser & Opto-Electronics Progress*, 2007, **44**(10): 32~38  
冯宇彤, 孟俊清, 陈卫标. 人眼安全全固态激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(10): 32~38
- 3 Dong Shufu, Chen Guofu, Wang Xianhua *et al.*. Experimental researches on  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  co-doped silica fiber lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 129~132  
董淑福, 陈国夫, 王贤华等.  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  共掺石英光纤激光器的实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 129~132
- 4 Wang Zhenguo, Ju Youlun, Li Yufeng *et al.*. Injection-locking  $2\ \mu\text{m}$  solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 17~20  
王振国, 鞠有伦, 李玉峰等.  $2\ \mu\text{m}$  固体激光器的注入锁定[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 17~20
- 5 Zhu Yachen, Lan Ge, Li Tong *et al.*.  $2\ \mu\text{m}$   $\text{KTiOAsO}_4$  optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2059~2063  
朱雅琛, 兰 戈, 李 彤等. 脉冲式  $2\ \mu\text{m}$   $\text{KTiOAsO}_4$  光参变振荡器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2059~2063
- 6 Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng *et al.*. Technical study of  $\text{ZnGeP}_2$  optical parametric oscillator pumped by a  $2\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 39~42  
姚宝权, 贺万骏, 李玉峰等.  $2\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  YLF 激光抽运  $\text{ZnGeP}_2$  光参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 39~42
- 7 L. D. da Vila, L. Gones, L. V. G. Tarelho *et al.*. Dynamics of  $\text{Tm}^{3+}$ - $\text{Ho}^{3+}$  energy transfer and deactivation of the  $^3\text{F}_4$  low level of thulium in fluoroziuconate glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(10): 5451~5463
- 8 X. Zou, H. Toratani. Spectroscopic properties and energy transfers in  $\text{Tm}^{3+}$  singly and  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  doubly-doped glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1996, **195**(1): 113~124
- 9 Wu Jianfeng, Jiang Shibin, Qua Tiejun *et al.*.  $2\ \mu\text{m}$  lasing from highly thulium doped tellurite glass microsphere [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211118
- 10 Geng Jihong, Wu Jianfeng, Jiang Shibin *et al.*. Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near  $2\ \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 355~357
- 11 Y. H. Tsang, D. J. Coleman, T. A. King. High power  $1.9\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$ -silica fibre laser pumped at  $1.09\ \mu\text{m}$  by a  $\text{Yb}^{3+}$ -silica fibre laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1-6): 357~364
- 12 R. M. Percival, D. Szebesta, S. T. Davey *et al.*. Thulium sensitised holmium-doped CW fluoride fibre laser of high efficiency [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24): 2231~2232
- 13 S. D. Jackson. 8 W diode-cladding-pumped  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  doped fluoride fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(13): 821~822
- 14 Zhang Yunjun, Wang Yuezhu, Ju Youlun *et al.*. Progress of  $\text{Tm}^{3+}$ -doped fiber laser [J]. *Laser & Opto-Electronics Progress*, 2005, **42**(6): 34~43  
张云军, 王月珠, 鞠有伦等. 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器的进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(6): 34~43
- 15 Wu Jianfeng, Yao Zhidong, Zong Jie *et al.*. Highly efficient high-power thulium doped germinate glass fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 638~640
- 16 Billy Richards, Yuen Tsang, David Binks *et al.*. Efficient  $2\ \mu\text{m}$   $\text{Tm}^{3+}$ -doped tellurite fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 402~404
- 17 Bo Peng, Tetsuro Izumitani. Optical properties, fluorescence mechanisms and energy transfer in  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  and  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  doped near-infrared laser glasses, sensitized by  $\text{Yb}^{3+}$  [J]. *Opt. Mater.*, 1995, **4**(6): 797~810