

文章编号: 0258-7025(2003)09-0847-05

# Er<sup>3+</sup> 单掺和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺碲钨酸盐 玻璃光谱性能

李家成<sup>1,2</sup>, 李顺光<sup>1</sup>, 胡和方<sup>1</sup>, 干福熹<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 制备了 Er<sup>3+</sup> 单掺和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺碲钨酸盐玻璃, 测量了 Er<sup>3+</sup> 在玻璃中的吸收光谱和 970 nm LD 激发下的荧光光谱和荧光寿命, 计算了 Er<sup>3+</sup> 离子 1.5 μm 波段的吸收和发射截面, 研究了其荧光强度和发射带宽与掺 Yb<sup>3+</sup> 浓度间的关系。结果表明, 共掺 Yb<sup>3+</sup> 可明显提高 Er<sup>3+</sup> 离子 1.5 μm 荧光发射强度, 并有利于提高其发射带宽。实验所得最佳掺 Yb<sup>3+</sup> 离子浓度为 3.66 × 10<sup>20</sup> ions/cm<sup>3</sup>, Er<sup>3+</sup> 离子 1.5 μm 发射最大 FWHM 值为 81 nm。

**关键词** 玻璃; 碲钨酸盐玻璃; Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺; 光谱性能

**中图分类号** O 433; TQ 171.71 **文献标识码** A

## Spectroscopic Properties of Er<sup>3+</sup>-doped and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped Tungsten-tellurite Glasses

LI Jia-cheng<sup>1,2</sup>, LI Shun-guang<sup>1</sup>, HU He-fang<sup>1</sup>, GAN Fu-xi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The Er<sup>3+</sup>-doped and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped tungsten-tellurite glasses were prepared. The absorption spectra, 1.5 μm emission spectra and fluorescence lifetime of Er<sup>3+</sup> excited at 970 nm, were measured. The absorption and emission cross-sections were calculated. The dependence of Yb<sup>3+</sup> concentration upon 1.5 μm emission intensity and bandwidth of Er<sup>3+</sup> were investigated. Yb<sup>3+</sup>-codoping can improve the 1.5 μm emission intensity of Er<sup>3+</sup> effectively and increase its FWHM. The optimum Yb<sup>3+</sup> concentration was 3.66 × 10<sup>20</sup> ions/cm<sup>3</sup> and a broad 1.5 μm emission spectrum of 81nm FWHM was demonstrated.

**Key words** glass; tungsten-tellurite glass; Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped; spectroscopic properties

## 1 引言

Er<sup>3+</sup> 和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 掺杂材料作为第三通信窗口及人眼安全区域的激光增益介质, 多年来一直受到人们的重视。Er<sup>3+</sup> 离子能级结构对 1.5 μm 光放大是一个三能级系统, 这就要求较高的抽运速率以使粒子数反转, 而 Er<sup>3+</sup> 在 980 nm 附近较低的吸收截面也限制了其抽运效率。Yb<sup>3+</sup> 在 980 nm 附近有很强的吸收, 并且 Yb<sup>3+</sup> 发射 (<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>) 与 Er<sup>3+</sup> 吸收 (<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>) 在光谱上存在很大重叠, 保证了从 Yb<sup>3+</sup> 到 Er<sup>3+</sup> 有较高的能量传递效率, 因此, 通

过引入 Yb<sup>3+</sup> 敏化 Er<sup>3+</sup> 将大大提高 Er<sup>3+</sup> 对 980 nm 抽运光的吸收。

近年来, 碲钨酸盐玻璃作为宽带掺铒光纤放大器 (EDFA) 基质材料引起人们广泛的关注和研究, 并已在掺铒碲钨酸盐玻璃上实现了 Er<sup>3+</sup> 离子 1.5 μm 发射 75 nm 的宽带增益<sup>[1,2]</sup>; 另外, 出于全光通信系统对集成光学器件的需要, 碲钨酸盐玻璃在作为平面光波导放大器 (EDWA) 基质材料上也日渐引起人们的重视<sup>[3]</sup>。碲钨酸盐玻璃折射率高 (n<sub>d</sub> 大多在 2.0 左右), 也具有较好的化学稳定性。同石英玻璃基质相比, Er<sup>3+</sup> 在碲钨酸盐玻璃中还具有更大的 1.5 μm 发

收稿日期: 2003-01-17; 收到修改稿日期: 2003-03-26

作者简介: 李家成(1974—), 男, 四川隆昌人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事稀土掺杂玻璃材料的研究。E-mail: jiachengli2001@yahoo.com.cn

射带宽和更大的受激发射截面。同时,  $\text{Er}^{3+}$  离子在碲酸盐玻璃中的溶解性也比在石英玻璃中更好, 因而有可能实现高浓度稀土离子掺杂而无严重离子团聚。碲酸盐玻璃作为掺  $\text{Er}^{3+}$  基质也存在不足。首先, 基质相对较低的声子能量 ( $770 \text{ cm}^{-1}$ ) 使得  $\text{Er}^{3+}$  的  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  无辐射衰减速率较慢而不能采用  $980 \text{ nm}$  光抽运; 其次, 碲酸盐玻璃转变温度较低 ( $T_g \approx 290^\circ\text{C}$ ), 在高抽运强度下易产生玻璃的热破坏。

碲钨酸盐玻璃比碲酸盐玻璃具有更高的声子能量 ( $920 \text{ cm}^{-1}$ )<sup>[4]</sup>, 这使得共掺  $\text{Yb}^{3+}$  采用  $980 \text{ nm}$  LD 抽运成为可能; 同时, 碲钨酸盐玻璃还具有较高的  $T_g$  ( $390^\circ\text{C}$  左右), 玻璃热稳定性好;  $\text{Er}^{3+}$  在碲钨酸盐玻璃中也具有很大的  $1.5 \mu\text{m}$  发射带宽。本文研究了  $\text{Er}^{3+}$  单掺和  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺碲钨酸盐玻璃的光谱性能, 为其在宽带 EDFA 和 EDWA 上的应用提供参考。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

实验选取的碲钨酸盐玻璃化学组成为  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$ , 其中掺  $\text{Er}^{3+}$  浓度在  $3.66 \times 10^{20} \text{ ions/cm}^3$  左右,  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度在  $1.82 \times 10^{20} \sim 2.39 \times 10^{21} \text{ ions/cm}^3$  之间。实验中所用原料均为分析纯以上氧化物, 其中  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  质量百分含量为 99.9%。将由上述原料组成的 50 g 玻璃配合料充分混匀后装入黄金坩埚内, 再放置在温度为  $750 \sim 950^\circ\text{C}$  的硅碳棒电阻炉中进行熔制, 同时向玻璃液中通入干燥的氧气以减少玻璃中 OH 基含量。熔制 90 min 后, 在预热的铝模上浇注成型, 接着在玻璃转变温度  $T_g$  附近退火 90 min, 随炉冷却至室温。将退火后样品研磨、抛光, 加工成尺寸为  $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的样品用于吸收光谱、荧光光谱测试和荧光寿命等光学测试。

### 2.2 光谱性能测试

光谱测试在常温下进行。吸收光谱、荧光光谱分别在 JASCO V-570 UV/VIS/NIR 型和 TRIAX550 型双光栅光谱仪上测定。荧光光谱所用抽运源为 InGaAs 激光二极管 (LD), 抽运波长为  $970 \text{ nm}$ 。测量时激发位置离样品边缘  $1 \text{ mm}$ , 以尽量减少荧光自吸收的影响。激发产生的近红外荧光采用 PbS 探测器进行接收。单色仪为国产 WDG30 型, 光电倍增管为 R940-02 型, 荧光信号由 XWT-264 型记录仪记录。测定荧光寿命时, 将  $970 \text{ nm}$

InGaAs LD 脉冲频率调到  $20 \text{ Hz}$ , 示波器上显示其荧光衰减曲线, 可直接读出荧光寿命。

## 3 结果与讨论

### 3.1 $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Yb}_2\text{O}_3$ 溶解性

测量了  $\text{Yb}^{3+}$  离子在  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  系统玻璃中  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  跃迁积分吸收强度随掺  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的变化关系, 这是一种分析稀土离子在玻璃中溶解性能的简单有效的方法<sup>[5]</sup>。如图 1 所示,  $\text{Yb}^{3+}$  离子  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  跃迁积分吸收强度随  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的变化呈现出良好的线性关系, 这说明  $\text{Yb}^{3+}$  在  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  玻璃中具有很好的溶解性能。由于稀土离子的相似性, 可以推断,  $\text{Er}^{3+}$  离子在该碲钨酸盐玻璃中也应具有很好的溶解性能。

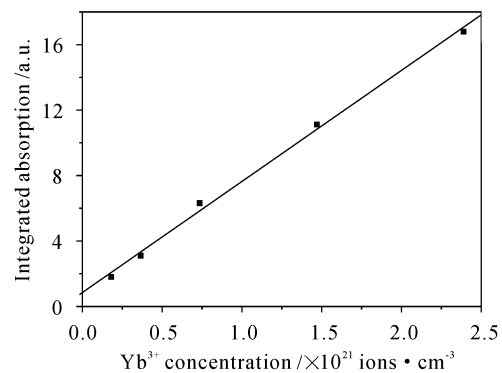


图 1 碲钨酸盐玻璃中  $\text{Yb}^{3+}$  离子  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  跃迁积分吸收强度与其浓度的关系

Fig. 1 Dependence of magnitudes of integrated absorption for  $\text{Yb}^{3+}$  ( ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ ) on its concentration in  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3$  glasses

### 3.2 吸收截面与发射截面

$\text{Er}^{3+}$  离子  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  跃迁吸收截面和  $\text{Yb}^{3+}$  离子  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  跃迁吸收截面可直接从测量的吸收光谱计算得到

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{2.303 \lg(I_0/I)}{NL} \quad (1)$$

式(1)中  $\lg(I_0/I)$  为吸光率 ( $I_0$  为入射光强,  $I$  为通过厚度为  $L$  的介质后的光强),  $N$  为掺杂离子浓度 (单位为  $\text{ions/cm}^3$ )。

$\text{Er}^{3+}$  离子发射截面由 McCumber 理论计算得到<sup>[6]</sup>, 按照 McCumber 理论, 发射截面与吸收截面间存在如下关系

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \exp\left(\frac{\epsilon - hc\lambda^{-1}}{kT}\right) \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $\epsilon$  为与温度有关的激发能量。根据近似计算<sup>[7]</sup>, McCumber 公式可改写为

$$\sigma_{\text{emi}}(\lambda) = 1.1\sigma_{\text{abs}}(\lambda)\exp\left(\frac{E_0 - hc\lambda^{-1}}{kT}\right) \quad (3)$$

其中  $E_0$  为零线能量, 即  $^4I_{13/2}$  和  $^4I_{15/2}$  两能级最低 Stark 子能级之间的能量差, 对应于峰值吸收波长或峰值发射波长的能量。图 2 给出了 Er<sup>3+</sup> 离子在碲钨酸盐玻璃中的吸收和发射截面, 其中掺 Er<sup>3+</sup> 浓度为  $3.64 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>。在峰值波长 1530 nm 处,  $\sigma_{\text{abs}}$  和  $\sigma_{\text{emi}}$  分别为  $0.74 \text{ pm}^2$  和  $0.82 \text{ pm}^2$ 。显然, 同 Er<sup>3+</sup> 在其他玻璃基质中相比, Er<sup>3+</sup> 在碲钨酸盐玻璃中吸收截面和发射截面值均更大, 这主要是因为碲钨酸盐玻璃具有更高的折射率  $n$ , 而  $\sigma_{\text{emi}} \propto (n^2 + 2)^2/n^{[8]}$ 。

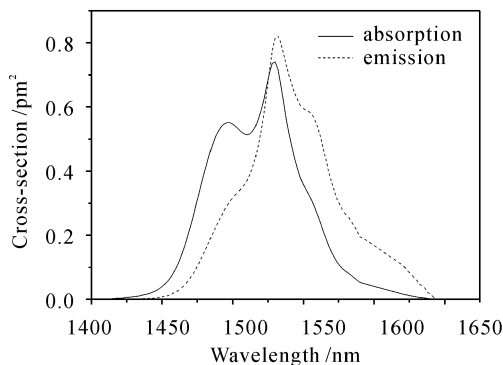


图 2 碲钨酸盐玻璃中 Er<sup>3+</sup> 离子 1.5  $\mu\text{m}$  的吸收截面和发射截面

Fig. 2 1.5  $\mu\text{m}$  absorption and emission cross-sections of Er<sup>3+</sup> in tungsten-tellurite glass

### 3.3 荧光特性

970 nm LD 抽运下, 在 Er<sup>3+</sup> 单掺和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 双掺的碲钨酸盐玻璃样品中均观察到位于 1.53  $\mu\text{m}$  附近 Er<sup>3+</sup> 离子的  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  荧光发射。图 3 给出了 Er<sup>3+</sup> 单掺和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 双掺的碲钨酸盐玻璃的 1.53  $\mu\text{m}$  发射的荧光光谱图, 其中单掺样品 Er<sup>3+</sup> 浓度为  $3.64 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>, 双掺样品 Er<sup>3+</sup> 浓度为  $3.64 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>, Yb<sup>3+</sup> 浓度为  $1.82 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>。由图 3 可以看出, 少量 Yb<sup>3+</sup> 离子的引入即可明显提高 Er<sup>3+</sup> 1.53  $\mu\text{m}$  荧光发射强度, 因而在碲钨酸盐玻璃中采用 Yb<sup>3+</sup> 敏化 Er<sup>3+</sup>, 进而采用 970 nm LD 抽运是可行的。

在 970 nm 处, Yb<sup>3+</sup> 离子存在很强的吸收, 如图 4 所示, 其吸收截面约为 Er<sup>3+</sup> 吸收截面的 6 倍。图 4 为图 3 所示的 Er<sup>3+</sup> 单掺和 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺玻璃样

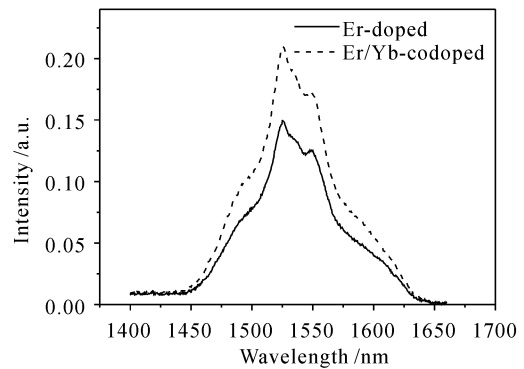


图 3 970 nm 激发下碲钨酸盐玻璃中 Er<sup>3+</sup> 离子的 1.5  $\mu\text{m}$  发射谱

Fig. 3 1.5  $\mu\text{m}$  emission spectra of Er<sup>3+</sup> in tungsten-tellurite glasses, excited at 970 nm

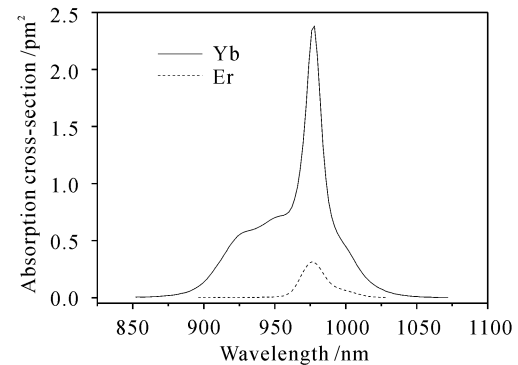


图 4 碲钨酸盐玻璃中 Yb<sup>3+</sup> 和 Er<sup>3+</sup> 离子 970 nm 的吸收截面

Fig. 4 Absorption cross-section of Yb<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> at 970 nm band in tungsten-tellurite glasses

品在 970 nm 吸收带的吸收截面图。同时, Yb<sup>3+</sup> 离子简单的二能级结构使 Yb<sup>3+</sup> 离子不易产生浓度猝灭, 所以作为敏化剂时 Yb<sup>3+</sup> 离子掺杂浓度可较高。另外, 根据文献<sup>[9]</sup>的方法, 采用公式  $\eta = 1 - \tau/\tau^0$  ( $\eta$  为 Yb<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Er<sup>3+</sup> 的能量传递效率,  $\tau$  为 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺样品中测得的 Yb<sup>3+</sup> 离子的荧光寿命,  $\tau^0$  为该样品在没有 Er<sup>3+</sup> 离子时得到的 Yb<sup>3+</sup> 离子荧光寿命), 计算得到共掺样品中 Yb<sup>3+</sup>  $\rightarrow$  Er<sup>3+</sup> 的能量传递效率在 65%~70%。因此, 相比于 Er<sup>3+</sup> 单掺, Yb<sup>3+</sup> 共掺大大提高了抽运吸收效率, 并且 Yb<sup>3+</sup> 和 Er<sup>3+</sup> 之间有效的能量传递将远大于 Er<sup>3+</sup> 的基态吸收, 所以, Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺样品 1.53  $\mu\text{m}$  发射荧光强度要比 Er<sup>3+</sup> 单掺样品强许多。

为进一步寻找优化的敏化离子浓度, 制备了一系列不同掺 Yb<sup>3+</sup> 浓度的碲钨酸盐玻璃样品, 其中掺 Er<sup>3+</sup> 浓度在  $3.64 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup> 左右。图 5 给出

了  $\text{Er}^{3+}$  离子  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  跃迁峰值荧光强度与掺  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的关系。从图中可以看出,在相近的  $\text{Er}^{3+}$  离子浓度下,随着  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的增加,荧光强度先增加然后减少, $\text{Yb}^{3+}$  的最佳掺杂浓度与  $\text{Er}^{3+}$  离子掺杂浓度接近,为  $3.66 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>。一些基于简化速率方程模型的研究<sup>[10]</sup>表明, $\text{Er}^{3+}$  离子  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  荧光发射强度将随  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的增加而增强,但我们的实验结果并非如此。在初始阶段,随  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的增加,对抽运光吸收效率和  $\text{Yb}^{3+} (^2F_{5/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} (^4I_{11/2})$  能量传递的增加,荧光强度也增强,而  $\text{Yb}^{3+}$  浓度超过一定范围时,将减小荧光发射量子效率。这可能是由于高的掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度将使  $\text{Er}^{3+} (^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2})$  到  $\text{Yb}^{3+} (^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2})$  的背向能量传递速率增加,进而减少了  $^4I_{13/2}$  能级粒子布居数。另外,在过高掺  $\text{Yb}^{3+}$  情况下, $\text{Yb}^{3+}$  可能分布不均而形成“团簇”及“离子对”,而“团簇”和“离子对”极易同玻璃中的 OH 基等杂质发生作用而导致抽运能量的猝灭。

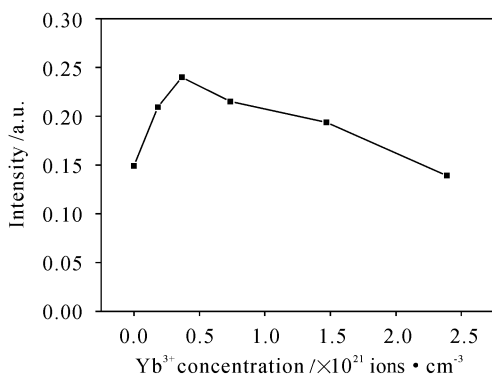


图 5 碲钨酸盐玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  离子 1530 nm 发射强度与  $\text{Yb}^{3+}$  离子浓度的关系

Fig. 5 Dependence of the 1.530  $\mu\text{m}$  emission intensity on  $\text{Yb}^{3+}$  concentration in tungsten-tellurite glasses

### 3.4 发射带宽与荧光寿命

$\text{Er}^{3+}$  在碲钨酸盐玻璃中具有很大的 1.5  $\mu\text{m}$  发射带宽,其 FWHM 值大多在 60 nm 以上。 $\text{Er}^{3+}$  在碲钨酸盐玻璃中也具有很大的 FWHM 值,实验中制得的所有  $\text{Er}^{3+}$  单掺和  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺碲钨酸盐玻璃的 1.5  $\mu\text{m}$  发射 FWHM 值均在 67 nm 以上。实验结果说明, $\text{Yb}^{3+}$  共掺有利于提高  $\text{Er}^{3+}$  1.5  $\mu\text{m}$  发射带宽,但不同掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度对提高 1.5  $\mu\text{m}$  发射带宽的效果不一样。为便于比较,图 6 给出了样品 1, 4 和 6 的归一化荧光光谱曲线,表 1 则列出了不同掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度样品中  $\text{Er}^{3+}$  1.5  $\mu\text{m}$  发射的 FWHM 值

及其荧光寿命  $\tau_m$ 。

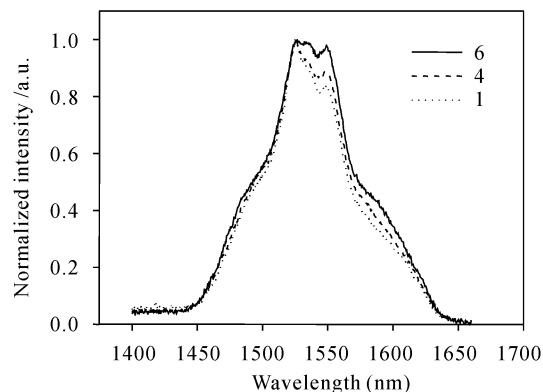


图 6 碲钨酸盐玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射归一化的荧光曲线

Fig. 6 Normalized 1.5  $\mu\text{m}$  emission spectra of  $\text{Er}^{3+}$  in tungsten-tellurite glasses

表 1 碲钨酸盐玻璃中不同掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度下  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射的 FWHM 与荧光寿命

Table 1 FWHM and lifetime of  $\text{Er}^{3+}$  1.5  $\mu\text{m}$  emission doped with different  $\text{Yb}^{3+}$  concentration in tungsten-tellurite glasses

| Sample | $N_{\text{Er}}$<br>/ $\times 10^{20}$<br>ions $\cdot \text{cm}^{-3}$ | $N_{\text{Yb}}$<br>/ $\times 10^{21}$<br>ions $\cdot \text{cm}^{-3}$ | FWHM<br>/nm | $\tau_m$<br>/ms |
|--------|--|--|-------------|-----------------|
| 1      | 3.64   | 0  | 69.5        | 3.4             |
| 2      | 3.64   | 0.182  | 67.0        | 3.1             |
| 3      | 3.66   | 0.366  | 70.5        | 3.2             |
| 4      | 3.67   | 0.736  | 75.5        | 3.2             |
| 5      | 3.68   | 1.470  | 74.5        | 3.8             |
| 6      | 3.68   | 2.389  | 81.0        | 3.8             |

从图 6 和表 1 可以看出,在  $\text{Er}^{3+}$  浓度基本不变的情况下,随着掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的不断增加,FWHM 值总的表现为不断增大,FWHM 值由不掺  $\text{Yb}^{3+}$  时的 69.5 nm 增大为掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度为  $2.389 \times 10^{21}$  ions/cm<sup>3</sup> 时的 81.0 nm,非常接近目前报道的  $\text{Er}^{3+}$  1.5  $\mu\text{m}$  发射的最大 FWHM 值 85 nm<sup>[11]</sup>。当掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度与掺  $\text{Er}^{3+}$  浓度相当或更小时, $\text{Yb}^{3+}$  浓度的变化对 FWHM 值影响很小;当掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度为  $\text{Er}^{3+}$  浓度的 2 倍以上时,FWHM 值则随  $\text{Yb}^{3+}$  浓度的增加而明显增大。这可能是因为同  $\text{La}^{3+}$  相比, $\text{Yb}^{3+}$  与  $\text{Er}^{3+}$  具有更多的离子相似性,大量  $\text{Yb}^{3+}$  的引入使  $\text{Er}^{3+}$  更容易占据更多不同的格位分布,从而使不均匀展宽加大;同时,由于镧系收缩, $\text{Yb}^{3+}$  比  $\text{La}^{3+}$  具有更小的离子半径(分别为 0.094 nm 和

0.115 nm),因此 Yb<sup>3+</sup>比 La<sup>3+</sup>具有更大的离子场强,导致作用在 Er<sup>3+</sup>离子上的配位场更强,晶体场分裂加大,也使 Er<sup>3+</sup>离子发射展宽。从图 6 还可看出,在高掺 Yb<sup>3+</sup>浓度下,在 C 波段(1525~1565 nm)Er<sup>3+</sup>离子荧光强度分布更加平坦,因此,碲钨酸盐玻璃在作为宽带、平坦增益光纤放大器和光波导放大器基质材料方面具有十分重要的潜在应用。不同掺 Yb<sup>3+</sup>浓度下,各样品荧光寿命变化很小,都在 3.1~3.8 ms 之间,其荧光寿命的不规则变化可能与玻璃熔制过程中除水程度的不同有关。

## 4 结 论

1) Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在 TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>玻璃中具有很好的溶解性能,且 Er<sup>3+</sup>离子在碲钨酸盐玻璃中具有很大的 1.5 μm 吸收截面和受激发射截面,其峰值吸收截面和峰值计算发射截面分别为 0.74 pm<sup>2</sup>和 0.82 pm<sup>2</sup>。

2) 980 nm LD 抽运下, Yb<sup>3+</sup>共掺可明显提高 Er<sup>3+</sup>离子 1.5 μm 荧光发射强度,因此,采用 980 nm LD 抽运是可行的。研究中所得最佳掺 Yb<sup>3+</sup>离子浓度与掺 Er<sup>3+</sup>离子浓度十分接近,为 3.66 × 10<sup>20</sup> ions/cm<sup>3</sup>。

3) Er<sup>3+</sup>在碲钨酸盐玻璃中具有很大的 1.5 μm 发射带宽,实验所得最大 FWHM 值达 81nm;随掺 Yb<sup>3+</sup>浓度的增加,Er<sup>3+</sup>离子 1.5 μm 荧光发射呈宽带、平坦化变化趋势,因此 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺碲钨酸盐玻璃很有希望用作宽带、平坦增益 EDFA 和 EDWA 基质材料。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Ohishi, A. Mori, M. Yamada *et al.*. Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5-μm broadband amplification [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4):274~276
- 2 M. Yamada, A. Mori, H. Onon *et al.*. Broadband and gain-flattened Er<sup>3+</sup>-doped tellurite fibre amplifier constructed using a gain equaliser [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(4): 370~371
- 3 Y. Ding, S. Jiang, T. Luo *et al.*. Optical waveguides prepared in Er<sup>3+</sup>-doped tellurite glass by Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> ion-exchange [C]. *SPIE*, 2001, **4282**:23~30
- 4 T. Kosuge, Y. Benino, V. Dimitrov *et al.*. Thermal stability and heat capacity changes at the glass transition in K<sub>2</sub>O-WO<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> glasses [J]. *J. Noncryst. Solids*, 1998, **242**(2/3):154~164
- 5 Y. G. Choi, K. H. Kim, J. Heo. Spectroscopic properties of and energy transfer in PbO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass doped with Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, **82**(10):2762~2768
- 6 D. E. McCumber. Theory of phonon-terminated optical masers [J]. *Phys. Rev. A*, 1964, **134**(2):299~306
- 7 W. J. Miniscalco, R. S. Quimby. General procedure for the analysis of Er<sup>3+</sup> cross sections [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4):258~260
- 8 J. S. Wang, E. M. Vogel, E. Snitzer. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices [J]. *Opt. Mater.*, 1994, **3**(3/4):187~203
- 9 M. Inokuti, F. Hirayama. Influence of energy transfer by the exchange mechanism on donor luminescence [J]. *J. Chem. Phys.*, 1965, **43**(6):1978~1989
- 10 B.-C. Hwang, S. Jiang, T. Luo *et al.*. Characterization of cooperative upconversion and energy transfer of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> doped phosphate glasses [C]. *SPIE*, 1999, **3622**:10~18
- 11 S. Shen, M. Naftaly, A. Jha. Tungsten-tellurite — a host glass for broadband EDFA [J]. *Opt. Comm.*, 2002, **205**(1/3):101~105