

文章编号: 0253-2239(2004)05-673-5

## 宽带光放大器用掺 $\text{Er}^{3+}$ 碲钨酸盐玻璃

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

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

**摘要:** 制备了掺  $\text{Er}^{3+}$  的  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-ZnF}_2$  (TWZOF) 玻璃, 测量了  $\text{Er}^{3+}$  在玻璃中的吸收光谱和 970 nm 激光二极管激发下的荧光光谱和荧光寿命, 分别采用 J-O 理论和 McCumber 理论计算了  $\text{Er}^{3+}$  离子的 J-O 强度参量  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ) 和其 1.5  $\mu\text{m}$  发射的吸收截面和发射截面, 研究了其荧光强度、荧光寿命和发射带宽与  $\text{ZnF}_2$  含量的关系。结果表明,  $\text{Er}^{3+}$  在 TWZOF 玻璃中具有较大的 1.5  $\mu\text{m}$  发射截面, 其峰值发射截面为 0.86  $\text{pm}^2$ ; 同时,  $\text{Er}^{3+}$  在 TWZOF 玻璃中具有很大的 1.5  $\mu\text{m}$  发射带宽, 所得半峰全宽在 68~83 nm 之间;  $\text{Er}^{3+}$  在 TWZOF 玻璃中还具有较强的  $\Omega_2$  值和较大的  $\Omega_6$  值, 且随  $\text{ZnF}_2$  含量的增加,  $\Omega_2$  和  $\Omega_6$  均增大;  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射峰值荧光强度和荧光寿命总体也随  $\text{ZnF}_2$  含量的增加而增加。

**关键词:** 光学材料;  $\text{Er}^{3+}$  掺杂; 碲钨酸盐玻璃; 光谱性能; 宽带

中图分类号: O433; TQ171.71<sup>+</sup> 文献标识码: A

## $\text{Er}^{3+}$ -Doped Tungsten-Tellurite Glasses for Broadband Optical Amplifier

Li Jiacheng<sup>1,2</sup> Li Shunguang<sup>1</sup> Hu Hefang<sup>1,2</sup> Gan Fuxi<sup>1,2</sup>

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

(Received 21 April 2003; revised 17 June 2003)

**Abstract:** The  $\text{Er}^{3+}$ -doped  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-ZnF}_2$  (TWZOF) glasses were prepared. The absorption spectra, 1.5  $\mu\text{m}$  emission spectra and fluorescence lifetimes of  $\text{Er}^{3+}$ , excited at 970 nm, were measured. The J-O parameters  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ), absorption and emission cross-sections were calculated by Judd-Ofelt theories and McCumber theory, respectively. The dependence of the content of  $\text{ZnF}_2$  in glass composition upon 1.5  $\mu\text{m}$  emission intensity, fluorescence lifetime and bandwidth of  $\text{Er}^{3+}$  was investigated. In TWZOF glass,  $\text{Er}^{3+}$  ion had a large emission cross-section with a peak value of 0.86  $\text{pm}^2$ .  $\text{Er}^{3+}$  ions also had a broad 1.5  $\mu\text{m}$  emission spectrum in the glass, which had a FWHM between 68 nm and 83 nm. The maximum FWHM demonstrated here was 83 nm.  $\text{Er}^{3+}$  ion had a large value of  $\Omega_6$  and a small value of  $\Omega_2$  in TWZOF glass. With the increasing of the content of  $\text{ZnF}_2$ , The  $\Omega_2$  and the  $\Omega_6$  both increased. The emission intensity at peak wavelength and the fluorescence lifetime of  $\text{Er}^{3+}$  at 1.5  $\mu\text{m}$  also increased with the increasing of the content of  $\text{ZnF}_2$ .

**Key words:** optical material;  $\text{Er}^{3+}$ -doping; tungsten-tellurite glass; spectroscopic properties; broadband

### 1 引 言

光通信速率和传输容量的增加, 使宽带平坦增益的光纤放大器成为波分复用(WDM)传输系统中一个

急需的关键器件。近年来, 碲酸盐玻璃在作为宽带掺铒光纤放大器(EDFA)基质材料上引起人们广泛地关注和研究<sup>[1,2]</sup>; 另外, 出于全光通信系统对集成光学器件的需求, 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>。现已在掺铒碲酸盐玻璃上实现  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射 76 nm 的宽带平坦增益<sup>[1,2]</sup>, 并且, 大多数对掺  $\text{Er}^{3+}$  碲

E-mail: jiachengli2001@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-04-21; 收到修改稿日期: 2003-06-17

酸盐玻璃的研究都集中在  $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$  (TZN) 基质玻璃上<sup>[4~6]</sup>。硝酸盐玻璃折射率高,并具有较好的化学稳定性。同石英玻璃基质相比,  $\text{Er}^{3+}$  在硝酸盐玻璃中还具有更大的  $1.5\ \mu\text{m}$  发射带宽和更大的受激发射截面;同时,  $\text{Er}^{3+}$  离子在硝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。硝酸盐玻璃在作为掺  $\text{Er}^{3+}$  基质上也存在不足。首先,基质相对较低的声子能量 ( $770\ \text{cm}^{-1}$ ) 使得  $\text{Er}^{3+}:^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  无辐射衰减速率很慢而不能采用  $980\ \text{nm}$  光抽运;其次,硝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<sup>[7]</sup>。

碲钨酸盐玻璃比硝酸盐玻璃具有更高的最大声子能量 ( $930\ \text{cm}^{-1}$ )<sup>[8]</sup>,这使得共掺  $\text{Yb}^{3+}$  采用廉价的  $980\ \text{nm}$  激光二极管抽运成为可能;同时,碲钨酸盐玻璃比硝酸盐玻璃具有更高的  $T_g$ ,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。目前,有关碲钨酸盐玻璃在作为掺  $\text{Er}^{3+}$  基质方面的研究很少,且集中在  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-R}_2\text{O}$  ( $R=\text{K, Na, Li}$ ) 系统上<sup>[3,7]</sup>,本文研究了  $\text{Er}^{3+}$  掺杂  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-ZnF}_2$  玻璃的光谱性能,以探索其在宽带掺铒光纤放大器和平面光波导放大器上的应用。

## 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  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-ZnF}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ , 实验中保持  $\text{TeO}_2$ 、 $\text{WO}_3$  和  $\text{Er}_2\text{O}_3$  摩尔分数含量不变,  $\text{ZnO}$  和  $\text{ZnF}_2$  总摩尔分数为  $10\%$ , 掺  $\text{Er}^{3+}$  浓度在  $2.52 \times 10^{20}\ \text{ions/cm}^3$  左右。实验中所用原料均为分析纯以上氧化物和氟化物,其中  $\text{Er}_2\text{O}_3$  质量分数为  $99.99\%$ 。将由上述原料组成的  $80\ \text{g}$  玻璃配合料充分混匀后装入黄金坩埚,放置在温度为  $650\sim 920\ ^\circ\text{C}$  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  $\text{OH}$  基含量。熔制  $90\ \text{min}$  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  $90\ \text{min}$ ,随炉冷却至室温。将退火后样品研磨、抛光,加工成尺寸为  $15\ \text{mm} \times 15\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$  的样品用于吸收光谱、

荧光光谱、荧光寿命等光学测试。

### 2.2 性能测试

采用排水法测定玻璃的密度,密度测量的误差在  $\pm 0.001\ \text{g/cm}^3$  内。玻璃的折射率采用复旦大学研制的 RAP-1 型变角度扫描椭圆偏仪测量,折射率的测量误差在  $0.001$  内。玻璃的转变温度等特征温度由差热分析 (DTA) 测定,实验温度范围为  $300\sim 750\ ^\circ\text{C}$ ,升温速率为  $10\ ^\circ\text{C/min}$ ,实验误差在  $\pm 2\ ^\circ\text{C}$  内。

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 和 Jobin Yvon Triax550 双光栅荧光光谱仪上测定。荧光光谱所用抽运源为 InGaAs 激光二极管,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。测定荧光寿命时,将  $970\ \text{nm}$  激光二极管抽运源脉冲频率调到  $20\ \text{Hz}$ ,示波器上显示其荧光衰减曲线,可直接读出荧光寿命。荧光寿命测试的误差在  $\pm 0.1\ \text{ms}$  以内。

## 3 结果与讨论

### 3.1 玻璃物理性能和热性能

表 1 列出了实验中  $\text{Er}^{3+}$  掺杂  $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-ZnF}_2$  玻璃 (TWZOF) 样品的  $\text{ZnF}_2$  名义含量、密度、折射率 ( $n_d$ )、相应计算出的掺杂浓度和经差热分析确定的玻璃转变温度  $T_g$ 。图 1 表示了样品 1~4 的差热分析曲线。从表 1 可以看出玻璃折射率较高,都在  $2.04$  以上,且随着  $\text{ZnF}_2$  含量的增加,玻璃密度和折射率都降低。由于氟对玻璃结构具有弱化作用<sup>[9]</sup>,含氟多面体体积较大,因而玻璃密度随  $\text{ZnF}_2$  含量的增加而减小是正常的。玻璃折射率决定于玻璃内部组分的分子折射度和玻璃密度。玻璃密度越大,折射率越大;分子折射度越大,折射率越大。从表 1 可以看出,随  $\text{ZnF}_2$  引入量的增加,玻璃密度有所下降,因此密度的下降对玻璃折射率的降低起一定作用;同时,由于  $\text{F}^-$  的离子极化率小于  $\text{O}^{2-}$  离子,使  $\text{F}^-$  离子具有比  $\text{O}^{2-}$  离子更小的分子折射度 (分别为  $2.4$  和  $2.67$ ),因此,随  $\text{ZnF}_2$  引入量的增加,玻璃折射率值减小。反过来,玻璃折射率的下降也表明了玻璃中氟的存在。

Table 1 Physical properties and thermal property of glasses

Sample	$\text{ZnF}_2/\text{mol}\%$	$N_{\text{Er}}/(10^{20}\ \text{ions} \cdot \text{cm}^{-3})$	Density $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	Refractive index $/n_d$	$T_g/^\circ\text{C}$
1	0	2.55	5.916	2.112	359
2	5	2.53	5.905	2.074	355
3	8	2.52	5.900	2.053	352
4	10	2.51	5.892	2.035	347

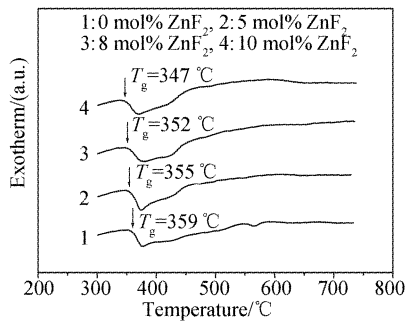


Fig. 1 DTA curves of tungsten-tellurite glasses

从图 1 可见, TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-ZnO-ZnF<sub>2</sub> 玻璃具有很好的成玻性能, 玻璃不存在析晶温度, 只存在很宽的、微弱的析晶温度范围; 随着温度的升高, 玻璃逐渐软化直到全部熔化。对不含氟化锌的样品 1, 在 565 °C 附近出现一个很弱的熔化峰, 而对 ZnO/ZnF<sub>2</sub> 共存的样品 2~4, 则根本没有熔化峰出现。所有样品具有类似的差热曲线轨迹, 玻璃 T<sub>g</sub> 在 350 °C 左右, 且随氟化锌含量的增加, T<sub>g</sub> 呈下降趋势。玻璃转变温度主要受网络阴阳离子结合键力和玻璃粘度影响。由于 F<sup>-</sup> 离子的离子性强, 电价低, 与网络形成离子的结合弱, 氟同时对玻璃网络起弱化作用<sup>[9]</sup>, 使玻璃粘度降低, 所以随 ZnF<sub>2</sub> 引入量的增加, 玻璃转变温度 T<sub>g</sub> 逐渐减小。ΔT(玻璃开始析晶温度 T<sub>x</sub> 与玻璃转变温度 T<sub>g</sub> 之差) 常用来衡量玻璃成玻性能的好坏。TeO<sub>2</sub>-ZnO-Na<sub>2</sub>O(TZN) 玻璃的 T<sub>g</sub> 约为 290 °C, ΔT 约为 120 °C<sup>[5]</sup>, 而 TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-ZnO-ZnF<sub>2</sub> (TWZOF) 玻璃由于不存在 T<sub>x</sub>, 因而 TWZOF 玻璃比 TZN 玻璃具有更好的成玻璃性能, 其玻璃转变温度 T<sub>g</sub> 也比 TZN 玻璃 T<sub>g</sub> 更高, 因此 TWZOF 玻璃具有很好的玻璃稳定性, 十分有利于光纤的拉制。

### 3.2 贾德-奥费勒特(Judd-Offelt)参量

根据室温测得的玻璃吸收光谱, 利用三参量 J-O 理论<sup>[10,11]</sup> 计算了 Er<sup>3+</sup> 掺杂 TWZOF 玻璃样品的三个 J-O 参量 Ω<sub>t</sub> (t=2,4,6)。图 2 给出了样品 3 的吸收光谱图, 其中 ZnF<sub>2</sub> 摩尔分数为 8%, Er<sup>3+</sup> 离子浓度为

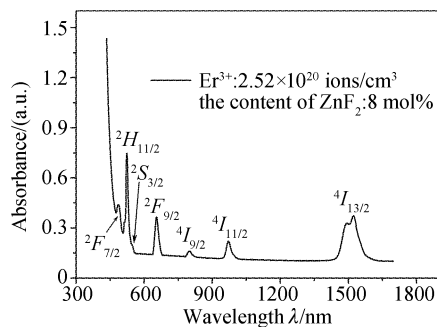


Fig. 2 Absorption spectra of Er<sup>3+</sup>-doped TWZOF glass

$2.52 \times 10^{20}$  ions/cm<sup>3</sup>。由于基质吸收截止和 Er<sup>3+</sup> 离子<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 能级的吸收太弱, 在吸收光谱中对应于<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 能级的吸收带极不明显。选取 Er<sup>3+</sup> 离子 980 nm、800 nm、657 nm 和 525 nm 四个吸收带, 利用文献<sup>[12]</sup> 给出的各吸收跃迁的二次约化矩阵元数值, 通过最小二乘拟合在计算机上计算了样品的三个 J-O 参量 Ω<sub>t</sub> (t=2,4,6), 结果列于表 2 中。表 2 同时给出了 Er<sup>3+</sup> 在 TZN 玻璃中的 Ω<sub>t</sub> (t=2,4,6)<sup>[1]</sup>。

Table 2 Judd-Offelt parameters of Er<sup>3+</sup> in TWZOF and TZN glasses

Sample	Ω <sub>2</sub> /(10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	Ω <sub>4</sub> /(10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	Ω <sub>6</sub> /(10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )
1	2.28	1.33	1.45
2	2.30	1.42	1.52
3	2.42	1.48	1.55
4	2.46	1.46	1.56
TZN	4.12	1.81	0.85

从表 2 可以看出, 同 TZN 玻璃基质相比, Er<sup>3+</sup> 在 TWZOF 玻璃基质中具有更小的强度参量 Ω<sub>2</sub> 和更大的 Ω<sub>6</sub> 值; 同时, 随着氟化锌含量的增加, Ω<sub>2</sub> 和 Ω<sub>6</sub> 也逐渐增加。一般认为<sup>[13]</sup>, Ω<sub>2</sub> 与玻璃中 Er-O 键的共价程度有关, 玻璃基质共价性越弱, Er-O 键的共价程度就大, Ω<sub>2</sub> 值就越大; Ω<sub>6</sub> 则与介质的刚性有关, 介质刚性越小, 即 Er-O 间的平均作用力常量越小, Ω<sub>6</sub> 越大。因此, 同 TZN 玻璃基质相比, 在 TWZOF 玻璃基质中 Er-O 键具有更小的共价性和更小的 Er-O 间的平均作用力常量, 介质刚性较小。由于 F<sup>-</sup> 比 O<sup>2-</sup> 具有更强的离子性, 所以随 ZnF<sub>2</sub> 引入量的不断增加, 玻璃基质离子性加大, 共价性减弱, 从而使 Er-O 键的共价程度加大, Ω<sub>2</sub> 值变大; 同时, 随 ZnF<sub>2</sub> 取代 ZnO 量的增加, 由于 F<sup>-</sup> 的影响, 使 Er-O 间的相互作用减弱, Er-O 间的平均作用力常量变小, 因此 Ω<sub>6</sub> 也逐渐变大, 基质的刚性减小。

### 3.3 吸收截面和发射截面

Er<sup>3+</sup> 离子<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 跃迁吸收截面(σ<sub>abs</sub>)可直接从测量的吸收光谱计算得到:

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

式中 lg(I<sub>0</sub>/I) 为吸光率, N 为掺杂离子浓度(单位为 ions/cm<sup>3</sup>), L 为样品吸收厚度。

Er<sup>3+</sup> 离子发射截面(σ<sub>em</sub>)由 McCumber 理论计算得到<sup>[14]</sup>:

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

式中 λ 为波长, c 为光速, h 为普朗克常量, k 为玻尔兹曼常量, T 为温度, ε 为与温度有关的激发能量。根

据近似计算<sup>[15]</sup>, McCumber 公式可改写为

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

其中  $E_0$  为零线能量, 即<sup>4</sup> $I_{13/2}$  和<sup>4</sup> $I_{15/2}$  两能级最低斯塔克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。计算结果说明, 所有样品在峰值吸收波长 1523 nm 处的吸收截面位于 0.775~0.784  $\mu\text{m}^2$  之间, 对应的计算发射截面为 0.852~0.864  $\mu\text{m}^2$ 。图 3 给出了  $\text{Er}^{3+}$  离子在碲钨酸盐玻璃样品 2 中的吸收和发射截面, 其中掺  $\text{Er}^{3+}$  浓度为  $2.53 \times 10^{20}$  ions/ $\text{cm}^3$ ,  $\text{ZnF}_2$  摩尔分数为 5%。在峰值吸收波长 1523 nm 处,  $\sigma_{abs}$  和  $\sigma_{em}$  分别为 0.78  $\mu\text{m}^2$  和 0.86  $\mu\text{m}^2$ 。显然, 同  $\text{Er}^{3+}$  在其它玻璃基质中相比,  $\text{Er}^{3+}$  在碲钨酸盐玻璃中吸收截面和发射截面均更大, 这主要是因为碲钨酸盐玻璃具有更高的折射率  $n$ , 而  $\sigma_{em} \propto (n^2 + 2)^2/n^4$ 。

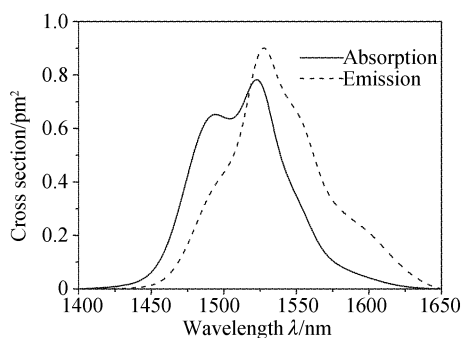


Fig. 3 The absorption and emission cross-sections of  $\text{Er}^{3+}$  in TWZOF glass

### 3.4 1.5 $\mu\text{m}$ 发射特性

970 nm 激光二极管抽运下, 在  $\text{Er}^{3+}$  掺杂  $\text{TeO}_2$ - $\text{WO}_3$ - $\text{ZnO}$ - $\text{ZnF}_2$  所有玻璃样品中均观察到了位于 1.53  $\mu\text{m}$  附近  $\text{Er}^{3+}$  离子的<sup>4</sup> $I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  荧光发射, 其发射峰值位于 1533 nm 处。图 4 给出了  $\text{Er}^{3+}$  掺杂 TWZOF 样品 1~4 的 1.5  $\mu\text{m}$  发射的荧光谱。表 3 则进一步给出了样品 1~4 中  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.53  $\mu\text{m}$  发射的峰值荧光强度  $I(\lambda_p)$ 、荧光发射半峰全宽 (FWHM) 和荧光寿命  $\tau_m$  等光谱参量, 表 3 同时也给出了根据 J-O 理论计算得出的  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.53  $\mu\text{m}$  发射的自发辐射几率  $A_{rad}$ 、自发辐射寿命  $\tau_{rad}$  和相应的荧光量子效率  $\eta$ 。

由表 3 可见, 实验测得的荧光寿命  $\tau_m$  比计算得到的自发辐射寿命  $\tau_{rad}$  要大, 从而使计算得出的  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射的荧光量子效率  $\eta = \tau_m/\tau_{rad}$  超过了 100%, 其值在 131.5%~135.7% 之间。对  $\text{Er}^{3+}$  离子在本系统玻璃中荧光量子效率超过了

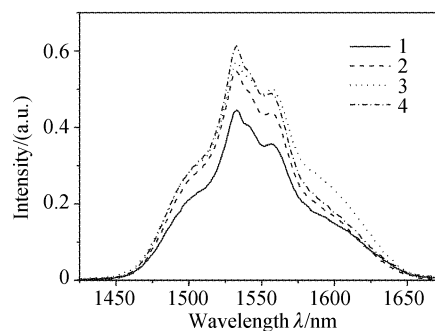


Fig. 4 Emission spectra of  $\text{Er}^{3+}$  at 1.5  $\mu\text{m}$  in TWZOF glasses, excited at 970 nm

100% 的原因, 我们尚不清楚, 但已有  $\text{Er}^{3+}$  离子在氟磷酸盐玻璃 (FP)<sup>[16]</sup> 和  $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  玻璃 (PBG)<sup>[17]</sup> 中 1.5  $\mu\text{m}$  发射荧光量子效率超过 100% 的报道 (分别约为 142.7%<sup>[16]</sup> 和 180.9%<sup>[17]</sup>)。另外, 从图 4 和表 3 均还可看出, 在  $\text{Er}^{3+}$  离子浓度相近的条件下, 随着  $\text{ZnF}_2$  含量的增加,  $\text{Er}^{3+}$  离子 1533 nm 峰值荧光强度增加, 荧光寿命总体也呈增加趋势。实验得到的  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射的半峰全宽值也较大, 在 68~83 nm 之间, 因此, TWZOF 玻璃很有希望用作宽带掺铒光纤放大器和平面光波导放大器基质材料。在  $\text{ZnF}_2$  的摩尔分数为 8% 时得到最大的半峰全宽为 83 nm, 与文献[7]报道的 85 nm 十分接近; 而组成中只含  $\text{ZnO}$  和  $\text{ZnF}_2$  二者之一时, 半峰全宽值则有所减小。我们认为峰值荧光强度和荧光寿命的增加主要应与加入氟化物的除水作用有关。在高温下,  $\text{F}^-$  可与玻璃中的一 OH 基发生反应:  $\text{F}^- + \text{-OH} \rightarrow \text{HF} \uparrow + \text{O}^{2-}$ , 使玻璃中一 OH 基含量减少。由于一 OH 基对  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  荧光发射具有强烈的猝灭作用, 所以一 OH 基含量的降低必将有利于增强  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  荧光发射。显然, 引入氟化锌越多, 对玻璃中一 OH 基含量的降低作用越明显, 所以, 随  $\text{ZnF}_2$  引入量的增加,  $\text{Er}^{3+}$  离子 1.5  $\mu\text{m}$  发射峰值荧光强度和荧光寿命均有所增加。另外, 随  $\text{ZnF}_2$  引入量的增加, 玻璃折射率的降低也有利于荧光寿命的增加, 因为根据 J-O 理论<sup>[10,11]</sup>, 自发辐射寿命  $\tau_{rad}$  随折射率的降低而增加, 因而测得的荧光寿命也会随折射率的降低而有所增加。

至于  $\text{ZnF}_2$  含量的变化引起半峰全宽变化的具体原因尚不清楚, 我们认为这可能与玻璃中  $\text{O}^{2-}$  和  $\text{F}^-$  两种阴离子共存时  $\text{Er}^{3+}$  离子周围局域晶场的变化有关。  $\text{F}^-$  阴离子的引入, 使  $\text{Er}^{3+}$  离子周围局域环境由原来单一的 Er-O 连接变为 Er-O 和 Er-F 两