

# Er<sup>3+</sup> 及 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃光谱性质研究<sup>\*</sup>

贾相华 吕树臣<sup>†</sup>

(哈尔滨师范大学物理系, 哈尔滨 150025)

(2006 年 8 月 13 日收到, 2007 年 1 月 22 日收到修改稿)

制备了 Er<sup>3+</sup> 及 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃, 测试了样品的吸收光谱、荧光光谱. 应用 Judd-Oflet 理论计算了 Er<sup>3+</sup> 在铋酸盐玻璃中的光谱强度参数, 分别为  $\Omega_2 = (5.47-2.92) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = (2.16-1.22) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = (1.29-0.80) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . 比较了 Er<sup>3+</sup> 及 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃在 980 nm 附近的吸收截面和 1.5  $\mu\text{m}$  的荧光发射光谱强度. Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃的荧光光谱半高宽达到 91 nm, 比 Er<sup>3+</sup> 单掺铋酸盐玻璃大 15 nm. 用 McCumber 理论计算了 Er<sup>3+</sup> 在 1.5  $\mu\text{m}$  的受激发射截面  $\sigma_e = 1.00 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . 比较了 Er<sup>3+</sup> 在不同基质中的光谱特性, 结果表明铋酸盐玻璃更适合作为掺铒光纤放大器的基质材料.

关键词: Er<sup>3+</sup>, 铋酸盐玻璃, Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺, 光谱性质

PACC: 7855, 4255R, 7840

## 1. 引 言

掺 Er<sup>3+</sup> 玻璃在 1.5  $\mu\text{m}$  的荧光发射对人眼是安全的, 并且在光通信的第三通信窗口, 可用于光通信光信号放大<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 随着计算机网络及其他数据传输服务的飞速发展, 长距离光纤传输系统对通信容量和系统扩展的需求日益增长, 传统的石英光纤放大器的带宽只有 35 nm, 已不能满足当前高速大容量通信传输的发展要求. 因此, 为了获得带宽宽、增益平坦的光纤放大器, 使光纤放大器的性能由 C 波段(1530—1565 nm)向 L 波段(1570—1610 nm)扩展, 满足当前密集波分复用(DWDM)系统对光放大器的要求, 掺 Er<sup>3+</sup> 玻璃已成为现在研究的一个热点. 研究者对氟磷酸盐玻璃<sup>[4]</sup>、硼酸盐玻璃<sup>[5]</sup>、锗酸盐玻璃<sup>[6]</sup>、氟化物<sup>[7]</sup>进行了研究. 碲酸盐玻璃由于带宽宽、受激发射截面大等优点而成为较合适的光纤放大器的基质材料<sup>[8,9]</sup>, 但碲酸盐玻璃也存在一些致命的缺点, 就是热稳定性差<sup>[10]</sup>、上转换发光严重<sup>[9]</sup>、原料的价格昂贵, 这些缺点限制了它的实际应用. 2000 年, Tanabe 等<sup>[11]</sup>报道了一种掺 Er<sup>3+</sup> 铋酸盐玻璃, 显示了较好的带宽特性, 但是由于 Er<sup>3+</sup> 在 980 nm 附近吸收较弱, 抽运效率不高, 使得 Er<sup>3+</sup> 在 1.5

$\mu\text{m}$  的发光强度较弱. Yb<sup>3+</sup> 在 980 nm 处存在着很强的吸收, 并且由于 Yb<sup>3+</sup> 是一个简单的二能级结构, 不存在上转换发光现象和浓度猝灭效应, 因此引入 Yb<sup>3+</sup> 来敏化 Er<sup>3+</sup> 将大大提高 Er<sup>3+</sup> 对 980 nm 抽运光的吸收. 为了改善 1.5  $\mu\text{m}$  的发光强度, 提高对抽运光的吸收效率, 本文研究了 Er<sup>3+</sup> 及 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃, 应用 Judd-Oflet(J-O)理论计算了 Er<sup>3+</sup> 在铋酸盐玻璃中的光谱强度参数, 分析玻璃成分变化对 Er—O 共价键的影响. 比较 Er<sup>3+</sup> 及 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃在 980 nm 附近的吸收光谱和 1.5  $\mu\text{m}$  的荧光光谱强度, 应用 McCumber 理论计算了 Er<sup>3+</sup> 在 1.5  $\mu\text{m}$  的受激发射截面, 分析了 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺铋酸盐玻璃的荧光光谱半高宽(FWHM)比 Er<sup>3+</sup> 单掺铋酸盐玻璃的荧光光谱的 FWHM 宽的原因. 同时, 还比较了 Er<sup>3+</sup> 在不同玻璃基质中的光谱特性.

## 2. 实 验

### 2.1. 样品制备

选取 50Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(25+x)B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20-x)ZnO5Na<sub>2</sub>O 组分为基质玻璃, 对其进行 Er<sup>3+</sup> 单掺的样品, 命名为 BZ1, BZ2, BZ3, Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺 BZ1 的样品命名为

<sup>\*</sup> 哈尔滨师范大学骨干教师计划 批准号 2001J01 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lushuchen63@yahoo.com.cn

BZ4. 其中  $B_2O_3$  以  $H_3BO_3$  的形式引入,  $Na_2O$  以  $Na_2CO_3$  的形式引入, 其他原料为相应的氧化物, 所用原料均为分析纯.  $Er^{3+}$  的掺杂浓度为 1mol%,  $Yb^{3+}$  的掺杂浓度为 5mol%,  $Er_2O_3$  和  $Yb_2O_3$  (99.99%) 是以高纯的形式引入. 精确称量 50 g 样品, 原料充分混合后, 放入到 30 mL 的陶瓷坩锅中, 先在 200 °C 的炉中烘干 2 h, 再置于 900—1000 °C 的硅钼棒电炉中熔化 40 min, 然后将熔融液体倒入到预热的铁板上, 并迅速放入马弗炉中, 在玻璃的转变温度附近退火 3 h, 然后自然冷却到室温. 把样品加工成型用于测试.

### 2.2. 性能测试

折射率采用 V 型棱镜法测得, 玻璃的密度用 Archimedes 法测量, 用蒸馏水作为浸没介质, 在分析天平上准确称量样品的质量. 样品的折射率、密度、 $Er^{3+}$  的浓度和  $Yb^{3+}$  的浓度在表 1 中列出. 吸收光谱在 JAS2 COV2570 型光谱仪上测得, 测量范围为 400—1700 nm. 荧光光谱的测试是用波长为 976 nm 的半导体激光器作为激发源. 所有测量均在室温下进行.

表 1 样品的密度、折射率、 $Er^{3+}$  和  $Yb^{3+}$  的浓度

| 样品  | 密度/ $g \cdot cm^{-3}$ | 折射率  | $Er^{3+}$ 浓度/ $10^{20} cm^{-3}$ | $Yb^{3+}$ 浓度/ $10^{20} cm^{-3}$ |
|-----|-----------------------|------|---------------------------------|---------------------------------|
| BZ1 | 6.22                  | 1.98 | 1.39                            | 0                               |
| BZ2 | 6.46                  | 2.02 | 1.43                            | 0                               |
| BZ3 | 6.64                  | 2.06 | 1.48                            | 0                               |
| BZ4 | 6.70                  | 2.09 | 1.44                            | 7.21                            |

## 3. 结果及讨论

### 3.1. 吸收光谱和 J-O 理论分析

$Er^{3+}$  单掺铈酸盐玻璃和  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺铈酸盐玻璃的吸收光谱如图 1 所示, 光谱展现了  $Er^{3+}$  典型的吸收特征.  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺铈酸盐玻璃在 980 nm 附近的吸收截面比  $Er^{3+}$  单掺铈酸盐玻璃在 980 nm 附近的吸收截面大得多, 并且有着更宽的吸收范围 (875—1050 nm). 在 980 nm 的激发下,  $Yb^{3+}$  的  ${}^2F_{5/2}$  能级上的能量以很快的能量传递 (ET) 的方式  $Yb({}^2F_{5/2}) + Er({}^4I_{15/2}) \rightarrow Yb({}^2F_{7/2}) + Er({}^4I_{11/2})$  转移到  $Er^{3+}$  的  ${}^4I_{11/2}$  能级上, 如图 2 所示. 在  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺体系中,  $Yb^{3+}$  是简单的二能级结构不存在上转换和浓

度猝灭效应, 从  $Yb^{3+}$  到  $Er^{3+}$  有很高的正向能量传递, 因此引入  $Yb^{3+}$  敏化  $Er^{3+}$  将大大提高  $Er^{3+}$  对 980 nm 的抽运光的吸收效率.

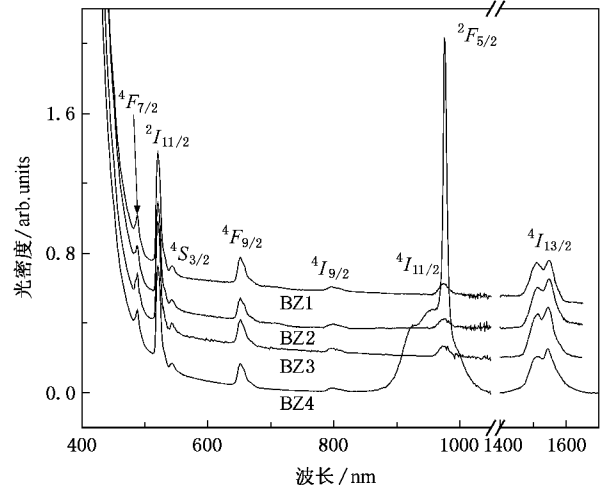


图 1  $Er^{3+}$  掺铈酸盐玻璃的吸收光谱

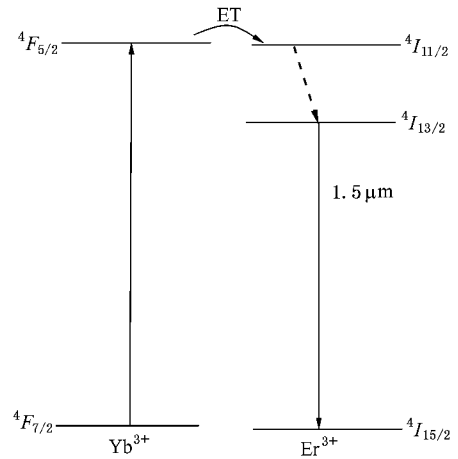


图 2  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺下的相互作用机理

J-O 理论<sup>[12,13]</sup>常常用于分析稀土离子在不同基质中的光谱性质, 如光谱强度参数  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ), 自发辐射跃迁概率、荧光分支比、辐射寿命等. 光谱强度参数  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ) 常用来分析玻璃基质的对称性、稀土离子与阴离子的共价性等<sup>[14]</sup>. 通过实验测得的吸收光谱, 用最小二乘法进行拟合.  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺铈酸盐玻璃在 980 nm 附近的吸收是  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$  共同吸收, 因此在计算时没有计入. 图 3 为  $Er^{3+}$  在不同样品的光谱强度参数  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ), 随着  $B_2O_3$  取代  $ZnO$  和  $Yb_2O_3$  的加入, 光谱强度参数  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ) 单调增加. Tanabe 等<sup>[14,15]</sup>研究表明,

$\Omega_2$  与玻璃基质结构和配位场的对称性有密切关系,  $\Omega_6$  与稀土离子的配位键的共价性有关, 并随配位键共价性的增强而减弱<sup>[15]</sup>. 稀土离子配位键的共价性可以通过调节玻璃的结构和组分来控制.  $B_2O_3$  是玻璃形成体, 在玻璃中以  $[BO_3]$   $[BO_4]$  结构单元形式存在. 随着  $B_2O_3$  含量的增加与  $Er^{3+}$  配位的非桥氧数减少, 减少的氧与  $B^{3+}$  离子配位, 这样基质的共价性增加,  $Er-O$  键的共价性减小,  $\Omega_6$  增加. 因此, 把  $Yb^{3+}$  加在 BZ3 样品中, 而  $Yb^{3+}$  的引入使  $\Omega_6$  又得以增加. 表 2 列出了  $Er^{3+}$  在不同基质中的光谱强度参数值. 通过比较可以看出,  $Er^{3+}$  在铋酸盐玻璃中  $\Omega_6$  值均大于其他玻璃基质中的值, 说明  $Er^{3+}$  在铋酸盐玻璃有较强的共价性,  $Er-O$  键的共价性较弱, 因此  $Er^{3+}$  受到晶体场的作用较弱, 能级的 Stark 劈裂较弱, 有利于形成较宽的荧光发射谱.

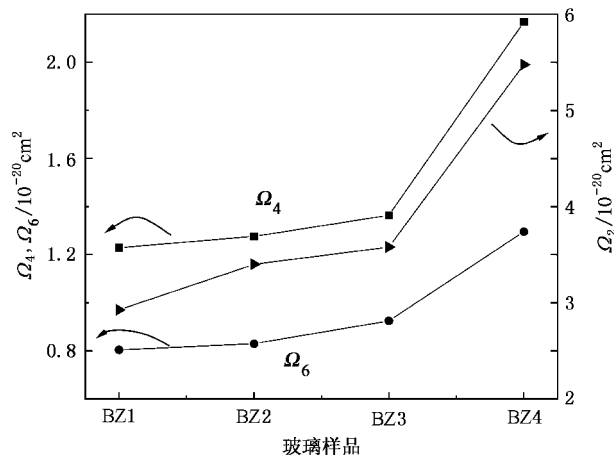


图 3 不同样品的光谱强度参数  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ )

表 2  $Er^{3+}$  在不同基质中的光谱强度参数

| 玻璃样品 | $\Omega_2/10^{-20} \text{ cm}^2$ | $\Omega_4/10^{-20} \text{ cm}^2$ | $\Omega_6/10^{-20} \text{ cm}^2$ | 数据来源    |
|------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|
| 锆酸盐  | 5.81                             | 0.85                             | 0.28                             | 文献 [16] |
| 磷酸盐  | 6.65                             | 1.52                             | 1.11                             | 文献 [16] |
| 氟化物  | 2.91                             | 1.63                             | 1.26                             | 文献 [16] |
| 硅酸盐  | 4.23                             | 1.04                             | 0.61                             | 文献 [16] |
| 碲酸盐  | 6.06                             | 1.57                             | 0.95                             | 文献 [10] |
| BZ4  | 5.76                             | 2.16                             | 1.29                             | 本文      |

$Er^{3+}$  的  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  跃迁的发射荧光光谱的 FWHM 可以用  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  的电偶极跃迁谱线强度  $S_{ed}$  和磁偶极跃迁谱线强度  $S_{md}$  之间的比值  $S_{ed}/(S_{ed} + S_{md})$  来衡量,  $S_{ed}/(S_{ed} + S_{md})$  越大越有利于形成平坦发射谱.  $S_{ed}$  和  $S_{md}$  分别表示为<sup>[12, 13]</sup>

$$S_{ed} = \sum_{t=2, 4, 6} \Omega_t | (S, L) J \| U^{(t)} \| (S', L') J' |^2, \quad (1)$$

$$S_{md} = \frac{e^2}{4m_e^2 c^2} | (S, L) J \| L + 2S \| (S', L') J' |^2. \quad (2)$$

从 (1) (2) 式中可以看出, 磁偶极跃迁谱线强度  $S_{md}$  与基质材料和配位场的性质无关, 是由跃迁的初状态和末状态的量子数决定. 对于特定跃迁, 磁偶极跃迁谱线强度  $S_{md}$  是常数. 电偶极跃迁谱线强度  $S_{ed}$  则是玻璃基质材料和配位场的函数. 为了获得宽带平坦的发射, 提高电偶极跃迁的相对比例是非常有效的途径. 根据 J-O 理论,  $Er^{3+}$  的  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  发射电偶极跃迁的谱线强度可以表示为<sup>[17]</sup>

$$S_{ed} [{}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}] = 0.019\Omega_2 + 0.118\Omega_4 + 1.426\Omega_6, \quad (3)$$

式中  $\Omega_t$  ( $t=2, 4, 6$ ) 前的系数是单位张量的约化矩阵元. 从 (3) 式可以看出,  $Er^{3+}$  的  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  跃迁的  $S_{ed}$  与  $\Omega_6$  起着重要作用. 因此, 为了增加光谱的宽度, 提高  $\Omega_6$  的值将是非常有效的. 一般而言,  $\Omega_6$  和折射率越大, FWHM 也较宽<sup>[18]</sup>.

### 3.2. 荧光光谱和受激发射截面

样品 BZ3 和 BZ4 的荧光光谱如图 4 所示, 荧光光谱的中心波长都是  $1.55 \mu\text{m}$ . 从图 4 可以明显看出, 样品 BZ4 的荧光强度比样品 BZ3 的荧光强度大得多.  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃在  $1.55 \mu\text{m}$  处荧光强度的提高应归功于  $980 \text{ nm}$  抽运效率的提高<sup>[19]</sup>, 因为  $Yb^{3+}$  在  $980 \text{ nm}$  的吸收比  $Er^{3+}$  在  $980 \text{ nm}$  的吸收更强, 而测量样品时始终未观测到上转换发光.

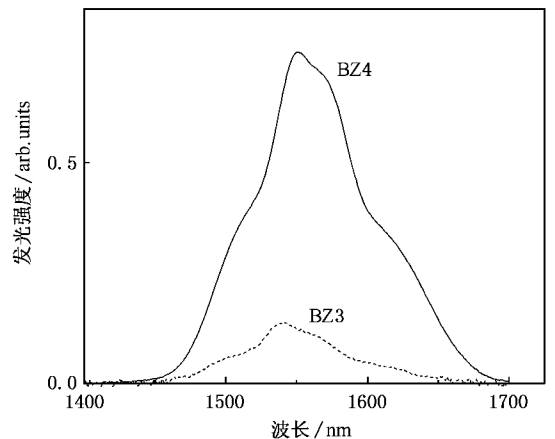


图 4 BZ3 和  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃的荧光光谱

图 5 为  $\text{Er}^{3+}$  的荧光光谱的 FWHM 随成分的变化. 从图 5 可以看出, 随着  $\text{B}_2\text{O}_3$  取代  $\text{ZnO}$ , FWHM 由 69 nm 增加到 76 nm, 而  $\text{Yb}^{3+}$  的引入使 FWHM 增加到 91 nm, 这是由于  $\text{Yb}^{3+}$  的引入使  $\text{Er}^{3+}$  周围的配位场发生较大变化, 导致  $\text{Er}^{3+}$  的荧光发射谱的非均匀展宽变大.

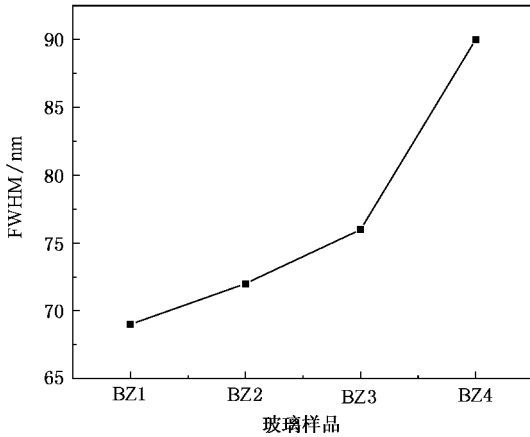


图 5  $\text{Er}^{3+}$  荧光光谱的 FWHM 随成分的变化

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃在波长  $1.55 \mu\text{m}$  的吸收截面可根据下式计算求得:

$$\sigma_a = \frac{2.303 I_0(I)}{NL}$$

式中  $I_0(I)$  为吸收光密度,  $N$  为  $\text{Er}^{3+}$  的浓度,  $L$  为样品的厚度.

根据 McCumber 理论<sup>[20]</sup>, 由吸收截面推导  $\text{Er}^{3+}$  的受激发射截面可表示为

$$\sigma_e = \sigma_a \exp\left[\frac{\epsilon - h\nu}{kT}\right]$$

式中  $\epsilon$  是在温度  $T$  下把一个  $\text{Er}^{3+}$  从基态  $^4I_{15/2}$  激发到激发态  $^4I_{13/2}$  所需要的自由能,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $h$  为普朗克常数,  $T$  为样品温度. 应用文献<sup>[21]</sup>的方

法, 计算得到  $\epsilon = 6508 \text{ cm}^{-1}$ . 计算所得的受激发射截面如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 计算得到的受激发射截面与测量得到的发射光谱线形符合较好. 在  $1.55 \mu\text{m}$  处的受激发射截面值约为  $1.00 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . 受激发射截面随折射率的增大而增大, 铋酸盐玻璃属于高折射率玻璃, 高折射率能够增强稀土离子格点处的局域晶场, 从而导致较大的无辐射跃迁. 因此,  $\text{Er}^{3+}$  在铋酸盐玻璃中具有较大的受激发射截面<sup>[10]</sup>.

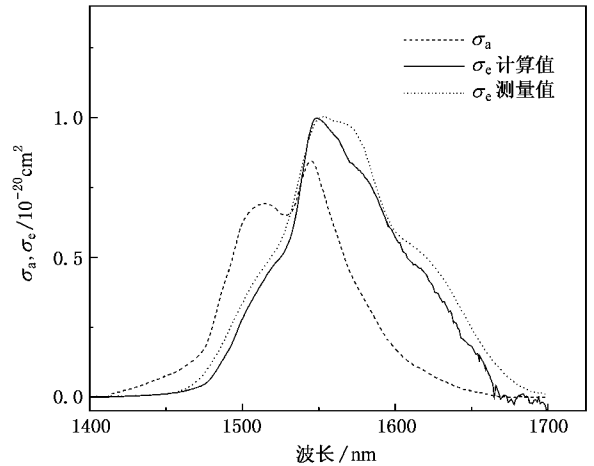


图 6  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  铋酸盐玻璃的吸收截面和发射截面

FWHM 和受激发射截面  $\sigma_e$  对光纤放大器实现宽带和高增益放大是非常重要的参数. 光纤的宽带特性可用  $\sigma_e$  与 FWHM 乘积来衡量, 两者的乘积越大表明增益带宽性越好. 较大的 FWHM 为宽带平坦增益提供了条件<sup>[22]</sup>. 表 3 列出了  $\text{Er}^{3+}$  在不同基质中的 FWHM 和  $\sigma_e$  的比较, 表明  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃的荧光光谱带宽性好, 这对当前应用的 DWDM 系统是非常有益的, 这种玻璃较适合作为掺饵光纤放大器候选基质材料.

表 3  $\text{Er}^{3+}$  在不同基质中的 FWHM 和  $\sigma_e$  的比较

| 玻璃样品                             | 碲酸盐    | 铋酸盐    | 硅酸盐    | 磷酸盐    | 锗酸盐    | BZ4  |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FWHM/nm                          | 77     | 75     | 40     | 47     | 53     | 91   |
| $\sigma_e/10^{-21} \text{ cm}^2$ | 10.3   | 8.5    | 5.5    | 6.4    | 5.7    | 10.0 |
| 数据来源                             | 文献 10] | 文献 16] | 文献 16] | 文献 16] | 文献 16] | 本文   |

## 4. 结 论

应用 J-O 理论计算了掺  $\text{Er}^{3+}$  铋酸盐玻璃的光谱强度参数. 随着  $\text{B}_2\text{O}_3$  取代  $\text{ZnO}$ , 光谱强度参数  $\Omega_i(t$

$= 2, 4, 6)$  单调增加, 在铋酸盐玻璃中的  $\Omega_6$  值均大于其他基质玻璃中的值, 说明铋酸盐玻璃有较强的共价性,  $\text{Er}^{3+}$  受到周围晶体场的作用较弱.  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃荧光强度比  $\text{Er}^{3+}$  单掺铋酸盐玻璃的荧光强度高,  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺铋酸盐玻璃

荧光光谱的 FWHM 比  $\text{Er}^{3+}$  单掺铋酸盐玻璃荧光光谱的 FWHM 大 15 nm. 比较了  $\text{Er}^{3+}$  在不同基质中的光谱特性, 在铋酸盐玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  具有较大的  $\sigma_e$  与

FWHM 乘积, 说明其带宽性较好, 这对于光纤放大器的应用十分有利.

- [ 1 ] Huang Y D, Mortier M, Auzel F 2001 *Opt. Mater.* **17** 501
- [ 2 ] Tikhomirov V K, Furniss D 2002 *J. Mater. Sci. Lett.* **21** 293
- [ 3 ] Ivanova T Y, Man 'shina A A, Kurochkin A V, Tver 'yanovich Y S, Smirnov V B 2002 *J. Non-Cryst. Solids* **298** 7
- [ 4 ] Li T, Zhang Q Y, Zhao C, Feng Z M, Shi D M, Deng Z D, Jiang Z H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1250
- [ 5 ] Sun J T, Zhang J H, Luo Y S, Lin J L, Song H W 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1325
- [ 6 ] Zhao C, Zhang Q Y, Yang Z M, Jiang Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3107 (in Chinese) [ 赵 纯、张勤远、杨中民、姜中宏 2006 物理学报 **55** 3107 ]
- [ 7 ] Nagamatsu K, Nagaoka S, Higashihata M, Vasa N J, Meng Z, Buddhudu S, Okada T, Kubota Y, Nishimura N, Teshima T 2004 *Opt. Mater.* **27** 337
- [ 8 ] Lin H, Liu K, Pun E Y B, Ma T C, Peng X, An Q D, Yu J Y, Jiang S B 2004 *Chem. Phys. Lett.* **398** 146
- [ 9 ] Wen L, Zhang L Y, Yang J H, Wang G N, Chen W, Hu L L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1486 (in Chinese) [ 温 磊、张丽艳、杨建虎、汪国年、陈 伟、胡丽丽 2006 物理学报 **55** 1486 ]
- [ 10 ] Yang J H, Dai S X, Zhou Y F, Wen L, Hu L L, Jiang Z H 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 977
- [ 11 ] Tanabe S, Sugimoto N, Ito S, Hanada T 2000 *J. Lumin.* **87—89** 670
- [ 12 ] Judd B R 1962 *Phys. Rev.* **127** 750
- [ 13 ] Ofelt G S 1962 *J. Chem. Phys.* **37** 511
- [ 14 ] Tanabe S, Ohyagi T, Soga N, Hanada T 1992 *Phys. Rev. B* **46** 3305
- [ 15 ] Tanabe S 1999 *J. Non-Cryst. Solids* **259** 1
- [ 16 ] Yang J H, Dai S X 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 5
- [ 17 ] Tanabe S, Ohyagi T, Todoroki S, Hanada T, Soga N 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 8451
- [ 18 ] Yang J H, Dai S X, Dai N L, Wen L, Hu L L, Jiang Z H 2003 *Spectrosc. Spec. Anal.* **23** 1065 (in Chinese) [ 杨建虎、戴世勋、戴能利、温 磊、胡丽丽、姜中宏 2003 光谱学与光谱分析 **23** 1065 ]
- [ 19 ] Li S F, Zhang Q Y, Lee Y P 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 4746
- [ 20 ] McCumber D E 1964 *Phys. Rev. A* **134** 299
- [ 21 ] Miniscalco W J, Quimby R S 1991 *Opt. Lett.* **16** 258
- [ 22 ] Yang J H, Dai S X, Wen L, Liu Z P, Hu L L, Jiang Z H 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 508 (in Chinese) [ 杨建虎、戴世勋、温 磊、柳祝平、胡丽丽、姜中宏 2003 物理学报 **52** 508 ]

# Spectroscopic properties of $\text{Er}^{3+}$ and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth glasses<sup>\*</sup>

Jia Xiang-Hua Lü Shu-Chen<sup>†</sup>

(*Department of Physics, Harbin Normal University, Harbin 150025, China*)

(Received 13 August 2006; revised manuscript received 22 January 2007)

## Abstract

The  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped bismuth glasses were prepared in this work. The absorption spectra and fluorescence spectra of the glasses were measured at room temperature. The strength parameters calculated according to the Judd-Ofelt theory from the absorption spectra are  $\Omega_2 = (5.47-2.92) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = (2.16-1.22) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , and  $\Omega_6 = (1.29-0.80) \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ . The absorption cross section at 980 nm and intensity of emission spectra at 1.5  $\mu\text{m}$  were compared. FWHM of the broad fluorescence band of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped bismuth glass at 1.5  $\mu\text{m}$  is 91 nm, which is 15 nm larger than that of  $\text{Er}^{3+}$ -doped bismuth glass. Emission cross section of  $\sigma_e = 1.00 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  has been obtained using McCumber theory. The optical properties of  $\text{Er}^{3+}$  ion in bismuth-based glass are discussed by comparing with other glasses. The results show that  $\text{Er}^{3+}$  doping of bismuth based glass is highly preferable for optical amplifier to realize broadband high gain amplification.

**Keywords:**  $\text{Er}^{3+}$ , bismuth glasses,  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped, spectroscopy property

**PACC:** 7855, 4255R, 7840

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Teachers Program of Harbin Normal University, China (Grant No. 2001J01).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lushuchen63@yahoo.com.cn