

# 铒铋共掺硼酸盐玻璃的光谱特性

高艳阳 金露 汤国玉 赵健 徐晓峰 康智慧 韦珏

(吉林大学物理学院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 采用氧化物高温熔融的方法制备出铒铋共掺的硼酸盐玻璃, 并对其吸收光谱和发射光谱进行了研究。应用 Judd-Ofelt 理论计算了铒铋共掺硼酸盐玻璃的 3 个强度参数  $\Omega_i$  ( $i=2, 4, 6$ ), 分别为  $\Omega_2 = 3.8249 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.6805 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.5069 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。在此基础上, 计算了电偶极跃迁的光谱强度  $S_{ed}$ , 自发辐射跃迁几率  $A$  以及吸收截面  $\sigma_{as}(\nu)$  等参数。根据 McCumber 理论, 计算了能级  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  跃迁的半峰全宽和受激发射截面, 结果表明铒铋共掺硼酸盐玻璃的半峰全宽可达 69.68 nm。

**关键词** 光谱学; 硼酸盐玻璃; Judd-Ofelt 理论; 吸收光谱; 发射光谱

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1215002

## Spectral Properties of Er<sup>3+</sup>-Bi<sup>3+</sup> Co-Doped Borate Glasses

Gao Yanyang Jin Lu Tang Guoyu Zhao Jian Xu Xiaofeng Kang Zhihui Wei Jue

(Physics College, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract** The Er<sup>3+</sup>-Bi<sup>3+</sup> co-doped borate glasses are fabricated by the method of oxide high-temperature melting. The absorption and emission spectra are studied. The intensity parameters  $\Omega_i$  ( $i=2, 4, 6$ ), determined by Judd-Ofelt theory, are calculated to be  $\Omega_2 = 3.8249 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.6805 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  and  $\Omega_6 = 1.5069 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , respectively. The spectral intensity of the electric dipole transitions, the spontaneous radiative transition probabilities and the absorption cross-sections are also calculated. The full width at half maximum (FWHM) and stimulated emission cross-sections of  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  transition are calculated by McCumber theory. The results show that the FWHM of Er<sup>3+</sup>-Bi<sup>3+</sup> co-doped borate glasses can reach 69.68 nm.

**Key words** spectroscopy; borate glasses; Judd-Ofelt theory; absorption spectra; emission spectra

**OCIS codes** 300.6170; 300.1030; 300.2140; 300.3700

## 1 引言

随着光通信系统的迅速发展以及波分复用技术的日益成熟, 对用于补偿传输损耗的光放大器带宽和增益平坦化都提出了更高的要求。掺铒光放大器的工作波长正好位于光纤通信最低损耗窗口 1530 nm 波段<sup>[1-4]</sup>, 因而围绕铒离子的敏化以提高光放大器的增益或带宽具有重要的研究价值。掺铒光放大器主要以玻璃为基底, 其中有较大受激发射截面的碲酸盐和磷酸盐玻璃曾被人们广泛关注, 但是, 碲酸盐热稳定性较差且其价格昂贵, 使其很难得到实际

应用<sup>[5]</sup>, 且在磷酸盐玻璃中掺杂铒离子浓度较高时易产生对放大不利的浓度淬灭效应<sup>[6]</sup>。研究发现, 硼酸盐玻璃是一种光学性能优良的激光玻璃材料, 具有近红外可见区透光率高、熔融温度低、化学稳定性良好、受激发射截面大、制备工艺简单等特点, 且在硼酸盐玻璃中可以掺杂浓度较高的铒离子<sup>[7-12]</sup>。如果在硼酸盐玻璃基质材料中同时引入铒离子和铋离子, 则可以有效地实现谱带加宽。

本文采用氧化物高温熔融的方法制备了一种铒铋共掺硼酸盐玻璃, 测试了其吸收光谱和发射光谱,

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-08-05

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J1103202)

作者简介: 高艳阳(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电功能材料与器件等方面的研究。

E-mail: yygao11@mails.jlu.edu.cn

导师简介: 韦珏(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电功能材料与器件等方面的研究。

E-mail: weijue@jlu.edu.cn(通信联系人)

并利用 Judd-Ofelt 理论计算了该玻璃的  $\Omega_\lambda$  参数、电偶极跃迁的谱线强度、自发辐射跃迁几率和吸收截面,另外又利用 McCumber 理论计算了玻璃发射光谱的半峰全宽(FWHM,  $f_{FWHM}$ )及发射截面等,通过与其他玻璃材料的比较分析,发现铒铋共掺硼酸盐玻璃具有较大的光谱强度值和受激发射截面与半峰全宽的乘积值。

## 2 实 验

铒铋共掺硼酸盐玻璃采用纯度为 99.5% 的硼砂( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )、99.0% 的氧化铋( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )和氧化铒( $\text{Er}_2\text{O}_3$ )为原料。将原料充分研磨后加入刚玉坩埚,待气氛炉稳定在 1000 °C 时将坩埚放入,经过熔化,反应,澄清,均化,退火等一系列过程,最后自然冷却至室温。退火后的玻璃经切割、抛光后,分别进行吸收光谱和发射光谱的测试。

折射率采用 BM-2WJ 型阿贝折射仪测试;吸收光谱采用 vaSpec-2048 型双通道光纤光谱仪来测量,该光纤光谱仪光源发出的光波长范围为 200~1100 nm;发射光谱采用 MS9710C 型光谱分析仪进行测试,抽运光源为 980 nm 激光器。所有测试均在室温下进行。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 吸收光谱和 Judd-Ofelt 理论分析

图 1 为玻璃样品的吸收光谱,玻璃组分为(质量分数):49%  $\text{B}_2\text{O}_3$ 、29%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、22%  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Er}_2\text{O}_3$  掺杂浓度为 1.15% (摩尔分数),各吸收峰对应的能级在图 1 中标出。

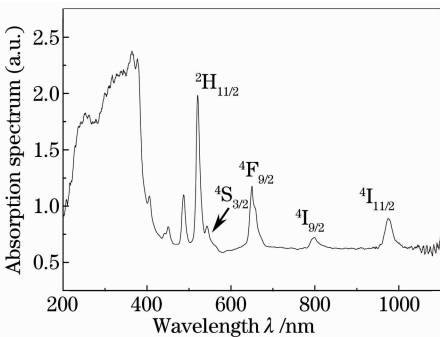


图 1 铒铋共掺硼酸盐玻璃的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectrum of  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Bi}^{3+}$  co-doped borate glass

稀土离子的发光强度可以用 Judd-Ofelt 理论进行分析<sup>[13-14]</sup>。按照 Judd-Ofelt 理论,电偶极跃迁振子强度可表示为

$$P_{\text{ed}} = \frac{8\pi^2 mc\nu}{3h(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} \times \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda |\langle 4f^N(\alpha SL)J \| U^{(\lambda)} \| 4f^N(\alpha'S'L')J' \rangle|^2, \quad (1)$$

式中  $m$  为电子质量,  $c$  为光速,  $\nu$  为波数( $\text{cm}^{-1}$ ),  $n$  为材料的折射率,  $h$  为普朗克常量,  $J$  为发生跃迁的角动量量子数,  $\Omega_\lambda$  为光学跃迁强度参数。另外单位张量约化矩阵元为  $|\langle 4f^N(\alpha SL)J \| U^{(\lambda)} \| 4f^N(\alpha'S'L')J' \rangle|$ , 与基质材料无关<sup>[15]</sup>, 令  $U(\lambda) = |\langle 4f^N(\alpha SL)J \| U^{(\lambda)} \| 4f^N(\alpha'S'L')J' \rangle|^2$ 。

各种谱项的实验振子强度可根据吸收光谱求得:

$$P_{\text{ex}} = \frac{mc^2}{\pi e^2 N} \int \alpha(\nu) d\nu, \quad (2)$$

式中  $m$  为电子质量,  $c$  为光速,  $e$  为电子电量,  $N$  为单位体积内稀土离子的数目,  $\alpha(\nu)$  为用波数表示的对应能级的吸收系数。实验振子强度包括电偶极跃迁和磁偶极跃迁振子强度,由于磁偶极跃迁的选择定则是:  $\Delta J = 0, \pm 1$  (不考虑  $0 \rightarrow 0$  跃迁), 因此从基态  $^4\text{I}_{15/2}$  到激发态  $^4\text{I}_{13/2}$ 、 $^4\text{I}_{11/2}$ 、 $^4\text{I}_{9/2}$ 、 $^4\text{I}_{7/2}$ 、 $^4\text{S}_{3/2}$ 、 $^2\text{H}_{11/2}$  的跃迁中,只有基态  $^4\text{I}_{15/2}$  到激发态  $^4\text{I}_{13/2}$  这个过程涉及到磁偶极跃迁,其余 5 个过程都只含有电偶极跃迁<sup>[16]</sup>。这里研究的几个跃迁均不涉及磁偶极跃迁,只有电偶极跃迁,因此由(1)式和(2)式可得

$$P_{\text{ed}} = \frac{mc^2}{\pi e^2 N} \int \alpha(\nu) d\nu = \frac{8\pi^2 mc\nu}{3h(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} \times \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda U(\lambda). \quad (3)$$

由(3)式可得

$$\sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda U(\lambda) = \left[ \frac{mc^2}{\pi e^2 N} \int \alpha(\nu) d\nu \right] / \left[ \frac{8\pi^2 mc\nu}{3h(2J+1)} \frac{(n^2+2)^2}{9n} \right]. \quad (4)$$

最后利用软件 Matlab7.0 矩阵计算出 Judd-Ofelt 强度参数分别是:  $\Omega_2 = 3.8249 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.6805 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.5069 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。根据 Judd-Ofelt 强度参数  $\Omega_\lambda$ , 由(5)~(7)式计算电偶极跃迁的光谱强度  $S_{\text{ed}}$ , 自发辐射跃迁几率  $A$  和吸收截面  $\sigma_{\text{as}}(\nu)$ :

$$S_{\text{ed}} = \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda |\langle 4f^N(\alpha SL)J \| U^{(\lambda)} \| 4f^N(\alpha'S'L')J' \rangle|^2, \quad (5)$$

$$A = A_{\text{ed}} = \frac{64\pi^4 e^2 \nu^3}{3h(2J+1)} \frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{\text{ed}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{as}(\nu) = \frac{\alpha(\nu)}{N}. \quad (7)$$

计算得到的电偶极跃迁光谱强度  $S_{ed}$ , 自发辐射跃迁几率  $A$  及吸收截面  $\sigma_{as}(\nu)$  如表 1 所示。将掺铒铋硼酸

表 1 计算所得样品玻璃中的电偶极跃迁光谱强度、自发辐射跃迁几率和吸收截面

Table 1 Spectral intensity of the electric dipole transitions, spontaneous radiative transition probabilities and absorption cross-sections of  $Er^{3+}$ - $Bi^{3+}$  co-doped borate glass

Transition	$\bar{\nu}/\text{cm}^{-1}$	$S_{ed}/(10^{-20} \text{ cm}^2)$	$A_{ed}/\text{s}^{-1}$	$\sigma_{as}(\nu)/(10^{-20} \text{ cm}^2)$
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	10254	0.7011	226	1.05
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	12515	0.2537	149	0.85
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	15375	1.6512	1800	1.39
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	18414	0.3443	645	0.97
${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	19208	3.5205	7484	2.34

### 3.2 发射光谱

在 980 nm 激光二极管激发下, 铒离子首先被激发至能级  ${}^4I_{11/2}$ , 由于  ${}^4I_{11/2}$  能级寿命较短, 快速弛豫到  ${}^4I_{13/2}$  能级, 然后从从激发态  ${}^4I_{13/2}$  跃迁到基态  ${}^4I_{15/2}$ 。图 2 为铒离子在该玻璃基底中从激发态  ${}^4I_{13/2}$  到基态  ${}^4I_{15/2}$  跃迁的发射光谱,  $Er_2O_3$  的掺杂浓度为 1.15% (摩尔分数)。

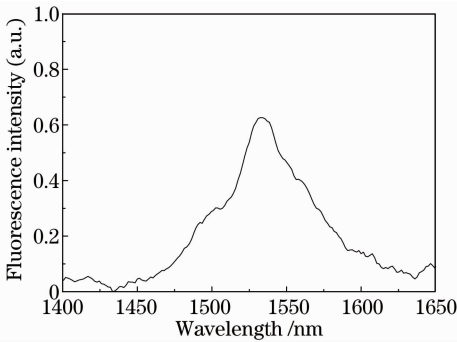


图 2 铒离子在样品玻璃中从态  ${}^4I_{13/2}$  向基态  ${}^4I_{15/2}$  跃迁的发射光谱

Fig. 2 Emission spectrum of  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  transition of  $Er^{3+}$  ion in sample glass

McCumber 理论<sup>[17-20]</sup>常用于稀土离子发射截面的计算, 根据 McCumber 理论可得铒离子在频率  $\nu$  处的受激发射截面  $\sigma_{es}(\nu)$  与吸收截面的关系为

$$\sigma_{es}(\nu) = \sigma_{as}(\nu) \exp[(E - h\nu)/kT], \quad (8)$$

式中  $\nu$  为光频率,  $h$  为普朗克常量,  $k$  为波尔兹曼常数,  $E$  为铒离子从态  ${}^4I_{13/2}$  到基态  ${}^4I_{15/2}$  的平均跃迁能量, 值为  $1.3 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $T$  为样品温度,  $\sigma_{as}(\nu)$  为基态  ${}^4I_{15/2}$  向激发态  ${}^4I_{13/2}$  跃迁的吸收截面, 通过吸收光谱求得值为  $1.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

此外, 半峰全宽的值可以利用软件 Origin8.0 拟合直接得到, 图 2 拟合后可得铒离子在该玻璃基底中从激发态  ${}^4I_{13/2}$  到基态  ${}^4I_{15/2}$  跃迁的发射光谱的

盐玻璃与其他玻璃相比, 除了  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$  跃迁  $S_{ed}$  值处于中等位置, 其他几个跃迁的  $S_{ed}$  值均最大。  $S_{ed}$  值越大, 相应发射光谱的带宽越宽、增益越平坦<sup>[17]</sup>。

半峰全宽为 69.68 nm。

不同基质玻璃中铒离子  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  跃迁发射的参数值如表 2 所示。由表 2 可知, 样品玻璃具有最大的  $\sigma_{es} \times f_{FWHM}$  值, 半峰全宽和发射截面的值对放大器或激光器的带宽和增益有重要作用,  $\sigma_{es} \times f_{FWHM}$  值越大, 增益带宽越宽<sup>[13]</sup>。所以铒铋共掺硼酸盐玻璃的增益带宽大于其他玻璃。

表 2 不同掺铒玻璃的 FWHM 和  $f_{FWHM} \times \sigma_{es}$  参数

Table 2 FWHM and  $f_{FWHM} \times \sigma_{es}$  in different  $Er^{3+}$ -doped glasses

	$\sigma_{es} / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	FWHM / nm	$\sigma_{es} \times f_{FWHM}$
Borate glass	1.49	69.68	103.8
Phosphate glass <sup>[19]</sup>	0.64	37	23.68
Germanate glass <sup>[19]</sup>	0.57	42	23.94
Silicate glass <sup>[20]</sup>	0.55	40	22
Tellurite glass <sup>[20]</sup>	0.75	65	48.75

另外,  $Er^{3+}$  在  ${}^4I_{13/2}$  能级的量子效率也是作为增益介质必须考虑的重要参量之一。研究表明, 硼酸盐玻璃中影响其量子效率的因素主要有声子弛豫、交叉弛豫以及残留的 OH 基团等<sup>[21]</sup>。解决这些问题的思路是, 一方面, 合理添加重金属氧化物来降低声子弛豫速率, 提高  ${}^4I_{13/2}$  能级的量子效率; 另一方面, 通过优化  $Er^{3+}$  的浓度和玻璃制作工艺 (如通过注入  $O_2$  鼓泡进行除水处理等<sup>[22]</sup>) 使交叉弛豫和 OH 基团的影响降到最低。相关研究留待以后进行。

## 4 结 论

在对铒铋共掺硼酸盐玻璃的研究中, 应用 Judd-Ofelt 理论计算得到样品玻璃的强度参数  $\Omega_2 = 3.8249 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_4 = 1.6805 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\Omega_6 = 1.5069 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。根据强度参数计算电偶

极跃迁的光谱强度  $S_{ed}$ , 自发辐射跃迁几率  $A$  和吸收截面  $\sigma_{as}(\nu)$ , 由此判定除了  $^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$  跃迁, 其他几个跃迁的  $S_{ed}$  值均最大。 $S_{ed}$  值越大, 相应发射光谱的带宽越宽、越平坦。根据 McCumber 理论计算铒铋共掺硼酸盐玻璃  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  跃迁发射的  $\sigma_{es} \times f_{FWHM}$  值为 103.8, 与其他玻璃相比最大, 表明铒铋共掺硼酸盐玻璃具有良好的带宽特性, 若经进一步优化处理, 有望成为宽频带放大器和激光器的合适基质材料。

## 参 考 文 献

- Chen Caihe. Optical Fiber Communications [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. 75-98.  
陈才和. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 75-98.
- Chen Jiong, Jia Dongfang, Yang Jingwen, *et al.*. All-fiber passively mode-locked erbium-doped fiber laser with ultra-low repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602005.  
陈炯, 贾东方, 杨敬文, 等. 超低重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602005.
- Zheng Libing, Wang Jianbin, Liang Xu, *et al.*. Study of polymer optical waveguide amplifier at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s105003.  
郑礼炳, 汪建斌, 梁旭, 等. 1.55  $\mu\text{m}$  波段聚合物光波导放大器的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s105003.
- Wu Xu, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang, *et al.*. Experimental investigation on superfluorescent sources based on erbium-doped photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306005.  
吴旭, 阮双琛, 刘承香, 等. 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306005.
- Zhao Shilong, Chen Baoyu, Hu Lili. Study on spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$ -doped tungsten-tellurite glass[J]. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(11): 1430-1436.  
赵士龙, 陈宝玉, 胡丽丽. 掺铒铋碲酸盐玻璃光谱性质的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(11): 1430-1436.
- Wang Lingfei. The Research of Rare Earth Ion Doped Phosphate Glass Optical Fiber Materials [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. 6-8.  
王凌飞. 稀土掺杂磷酸盐玻璃光纤材料的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012. 6-8.
- A Balakrishna, D Rajesh, Y C Ratnakaram. Structural and photoluminescence properties of  $\text{Dy}^{3+}$  doped different modifier oxide-based lithium borate glasses[J]. J Lumin, 2012, 132(11): 2984-2991.
- M A Marzouk. Optical characterization of some rare earth ions doped bismuth borate glasses and effect of gamma irradiation[J]. J Mol Struct, 2012, 1019: 80-90.
- N Sdiri, H Elhouichet, C Barthou, *et al.*. Spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  doped phosphate-borate glasses[J]. J Mol Struct, 2012, 1010: 85-90.
- S Sanghi, I Pal, A Agarwal, *et al.*. Effect of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  on spectroscopic and structural properties of  $\text{Er}^{3+}$  doped cadmium bismuth borate glasses [J]. Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 83(1): 94-99.
- Bi Ying, Wang Guosheng, Tian Yanwen. Research progress of rare earth borate luminescent material[J]. Materials Review, 2013, 27(1): 34-37.  
毕颖, 王国胜, 田彦文. 稀土硼酸盐发光材料的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(1): 34-37.
- Jin Lu. Preparation and Characterization of Erbium-Bismuth Co-Doped Borate Glass [D]. Changchun: Jilin University, 2012. 29-43.  
金露. 铒铋共掺硼酸盐玻璃基底的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. 29-43.
- B R Judd. Optical absorption intensities of rare-earth ions[J]. Phys Rev, 1962, 127(3): 750-761.
- G S Ofelt. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions[J]. J Chem Phys, 1962, 37(3): 511-520.
- Yang Guang, Lü Zengjian. The research on J-O theory of the band strength of rare-earth ions[J]. Physics and Engineering, 2008, 18(5): 21-23.  
杨光, 吕增建. 稀土离子谱带强度的 Judd-Ofelt 理论的研究[J]. 物理与工程, 2008, 18(5): 21-23.
- Zhang Siyuan. Spectroscopy of Rare Earth Ions: Spectral Properties and Spectral Theory [M]. Beijing: Science Press, 2008. 101-148.  
张思远. 稀土离子的光谱学: 光谱性质和光谱理论[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 101-148.
- J H Yang, S X Dai, Y F Zhou, *et al.*. Spectroscopic properties and thermal stability of erbium-doped bismuth-based glass for optical amplifier[J]. J Appl Phys, 2003, 93(2): 61-68.
- Sun Jiangting, Zhang Jiahua, Luo Yongshi, *et al.*. Spectra and its bandwidth of the 1.5  $\mu\text{m}$  emission in  $\text{Er}^{3+}$ -doped glass[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(9): 992-995.  
孙江亭, 张家骅, 骆永石, 等.  $\text{Er}^{3+}$  掺杂玻璃的 1.5  $\mu\text{m}$  发射光谱及其带宽[J]. 光电子 • 激光, 2003, 14(9): 992-995.
- Zhang Yong, Ren Guozhong, Yang Qibin, *et al.*. Spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$ -doped germanium bismuthate glass [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 999-1002.  
张勇, 任国仲, 杨奇斌, 等.  $\text{Er}^{3+}$  掺杂的锗铋酸盐玻璃光谱性质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 999-1002.
- D E McCumber. Theory of phonon-terminated optical masers[J]. Phys Rev, 1964, 134(2A): A299-A306.
- Qiuping Chen, Monica Ferraris, Daniel Milanese. Novel Er-doped  $\text{PbO}$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  based glasses; investigation of quantum efficiency and non-radiative transition probability for 1.5  $\mu\text{m}$  broadband emission fluorescence[J]. J Non-Cryst Solids, 2003, 324(1-2): 12-20.
- Zhou Yaxun, Wang Dagang, Yang Gaobo, *et al.*. Enhancement of 1.53  $\mu\text{m}$  fluorescence intensity of Er-doped tellurite-borate glass series[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(7): 1031-1035.  
周亚训, 王大刚, 杨高波, 等. 掺  $\text{Er}^{3+}$  碲硼酸盐玻璃 1.53  $\mu\text{m}$  波段荧光强度提高研究[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(7): 1031-1035.

栏目编辑: 韩峰